



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

*Optimización de recursos en los problemas de
transporte de mercancías de larga distancia
por carretera*

Autor:

Andrés Viñés Vitaller

Directores:

Emilio Larrodé Pellicer

Beatriz Royo Agustín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

Agradecimientos

A mis padres, Juan Manuel y Conchita, por hacer posible que haya llegado hasta aquí. Vuestro ejemplo me hace ser cada día mejor persona.

A mi hermano, que espero que te sientas tan orgulloso de mí como yo de ti.

A Elena, por apoyarme con infinita paciencia en los momentos más difíciles de trabajo.

A todos los compañeros y amigos, que de una forma u otra hemos compartido esta dura y bonita etapa de nuestra vida en la Universidad.

A Beatriz Royo, por tu inestimable colaboración y dedicación estos meses.

¡Este logro nunca hubiera sido posible sin vosotros!

“Optimización de recursos en los problemas de transporte de mercancías de larga distancia por carretera”

RESUMEN

Durante la realización de este Proyecto Fin de Carrera, se ha realizado un análisis del problema de planificación de rutas de transporte (VRP – Vehicle Routing Problem) para larga distancia por carretera. Este problema busca la optimización de los recursos en un espacio donde el número de soluciones crece exponencialmente conforme aumenta el número de órdenes o clientes a considerar.

Para resolver este tipo de problemas se utilizan métodos basados en técnicas heurísticas que permiten aproximarse a la solución óptima. Más concretamente, en el caso de este PFC, se ha utilizado el algoritmo de *Colonia de Hormigas*.

En el escenario que se plantea en el estudio se realizan envíos de material paletizado dentro del territorio peninsular español. Estos envíos se pueden realizar de forma directa o a través de dos *hubs*, en los cuales se permite la redistribución de mercancía. Además, se permite la parada intermedia en más de un nodo, tanto de origen como de destino. En las estrategias puras, todas las órdenes de envío siguen una de estas dos técnicas. Por el contrario, las estrategias mixtas asignan la técnica pura que más convenga a cada orden de envío.

En este PFC se ha realizado un análisis de sensibilidad de distintos parámetros del problema, como son el tamaño del problema, las ventanas temporales de carga y descarga y el tiempo de espera fuera de la ventana temporal, para comprobar si las estrategias mixtas resultan más económicas que las puras y bajo qué condiciones se cumple.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Objetivos del proyecto	2
1.2 Alcance.....	2
1.3 Estructura del documento	3
2. Estado del arte	5
2.1 Optimización combinatoria. NP-Hard.....	5
2.2 VRP (Vehicle Routing Problem).....	6
2.3 Estrategias de distribución.....	7
2.3.1 Estrategias puras	8
2.3.2 Estrategias mixtas	9
2.4 Técnicas metaheurísticas	9
2.4.1 Colonia de hormigas	11
3. Descripción del problema.....	13
3.1 Introducción	13
3.2 Restricciones	14
3.3 Diseño de experimentos	16
4. Descripción del problema.....	18
4.1 Introducción	18
4.2 Agrupación de rutas.....	18
4.3 Metodología.....	19
4.4 Análisis previos de agrupación	20
4.5 Resultados generales	22
4.6 Análisis de estrategias	24
4.6.1 Estrategia directa pura	24
4.6.2 Estrategia Hub&Spoke pura	25
4.6.3 Estrategias mixtas: Hub&Spoke modificada y heurística	26
4.7 Ratio estrategias puras – estrategias mixtas.....	27
4.8 Análisis adicionales	30
5. Conclusiones.....	31
5.1 Resumen de resultados y conclusiones.....	31
5.2 Líneas futuras.....	32
6. Bibliografía	33

7. Índice de tablas y figuras.....	34
7.1 Índice de tablas	34
7.2 Índice de figuras	34
 Anexo I. VRP (Vehicle Routing Problem)	37
1.1 Introducción	37
1.2 Variantes del VRP	38
1.3 Técnicas de solución del VRP	40
1.4 Modelo general del VRP	40
Anexo II. Clasificación de las técnicas metaheurísticas.....	43
2.1 Metaheurísticas basadas en trayectoria	43
2.2 Metaheurísticas basadas en población	44
Anexo III. Colonia de hormigas	46
3.1 Optimización de colonias de hormigas	46
3.2 Algoritmo de colonias de hormigas para el VRP	47
3.3 Rastro de feromona	47
3.4 Parámetro heurística	49
3.5 Probabilidad de preferencia	49
Anexo IV. Flujo de mercancías y localización de nodos	50
Anexo V. Resultados medios.....	51
5.1 5 órdenes de envío	51
5.2 25 órdenes de envío	52
5.3 50 órdenes de envío	53
5.4 100 órdenes de envío	54
5.5 250 órdenes de envío	55
Anexo VI. Resultados completos	56
6.1 5 órdenes de envío, 3 provincias	56
6.2 5 órdenes de envío, 21 provincias	58
6.3 25 órdenes de envíos, 3 provincias	60
6.4 25 órdenes de envío, 21 provincias	62
6.5 50 órdenes de envío, 3 provincias	64
6.6 50 órdenes de envío, 21 provincias	66
6.7 100 órdenes de envío, 3 provincias	68
6.8 100 órdenes de envío, 21 provincias	70
6.9 250 órdenes de envío, 3 provincias	72
6.10 250 órdenes de envío, 21 provincias	74

Anexo VII. Análisis detallado de 5 órdenes de envío	77
7.1 Introducción.....	77
7.2 5 órdenes de envío en 3 provincias	77
7.2.1 Caso 1.....	77
7.2.2 Caso 2.....	91
7.2.3 Caso 3.....	103
7.3 5 órdenes de envío en 21 provincias	115
7.3.1 Caso 1.....	115
7.3.2 Caso 2.....	127
7.3.3 Caso 3	139
Anexo VIII. % Agrupación Vs Nº de envíos	151
Índice de tablas y figuras.....	157
Bibliografía de anexos	166

1. INTRODUCCIÓN

La logística, que puede ser entendida por todos como el arte de disponer del servicio o producto necesario en la cantidad requerida, en el lugar oportuno y en el modo exacto, es definida por la Real Academia de la Lengua Española como *“el conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución”*.

Las actividades logísticas conforman el sistema de enlace entre las materias primas, la producción y los mercados. La misión fundamental de la logística es por tanto, optimizar un flujo de material regular a través de una red de enlaces de transporte y de centros del almacenaje, que incluye tanto la gestión de los flujos físicos como de información, así como la realización de actividades complementarias de manipulación de la mercancía, que le proporcionan valor añadido antes de la distribución final hasta el cliente. La implantación y el desarrollo de actividades logísticas suponen, en consecuencia, un factor de oportunidad para el aumento de la actividad económica de las empresas.

Tanto el problema de planificación de rutas como el de optimización de recursos son problemas de búsqueda de solución óptima, y se encuentran en un espacio donde el número de soluciones crece exponencialmente con el aumento del número de órdenes o clientes a considerar. La mayor parte de los estudios realizados en esta materia se centran en la distribución urbana o capilar, donde las distancias a recorrer son cortas, el número de puntos a visitar es elevado y la cantidad de carga es pequeña. Sin embargo, son más escasos los estudios encontrados sobre el transporte de larga distancia por carretera, donde el objetivo es el de optimizar el llenado de los vehículos y las restricciones principales son la capacidad del camión y las ventanas horarias de carga y descarga. Este hecho ha motivado la realización de un trabajo sobre el transporte de larga distancia por carretera.

Este proyecto se encuadra dentro de una línea de investigación en Ingeniería de Transporte y Logística que se está desarrollando en el Área de Ingeniería y Logística de los Transportes del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (E.I.N.A.) de la Universidad de Zaragoza y surge como continuación de un Proyecto Fin de Máster realizado por María Pilar Gil Rubio.

El proyecto ha sido realizado con la colaboración de Beatriz Royo Agustín, en el marco de la elaboración de su Tesis Doctoral.

1.1 Objetivos del proyecto

Los sistemas logísticos de distribución de mercancías en un escenario con varios orígenes y varios destinos, pueden estar basados en distintas estrategias en función del recorrido y de las paradas del medio de transporte.

Para realizar la distribución pueden seguirse dos tipos de estrategias, la pura y la mixta. Dentro de la estrategia pura se encuentran los envíos directos entre cada par origen-destino, el envío con varias paradas intermedias de carga y descarga y el envío a través de un *hub*. Un *hub* es un centro de distribución donde se concentra un flujo de mercancía de distintos orígenes pero mismo destino, aprovechando así las ventajas derivadas de economías de escala. La estrategia de distribución mixta es una combinación de las estrategias de distribución puras.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera, en adelante PFC, es validar si mediante técnicas metaheurísticas se puede resolver el problema de distribución de mercancía y estudiar si una estrategia de distribución mixta es mejor que las estrategias de distribución puras. Para ello, se van a realizar una serie de simulaciones de distribución para el transporte de mercancías de larga distancia por carretera, realizando la planificación de las rutas para cada una de las estrategias de distribución y se comparará el coste asociado a cada una de ellas.

El escenario que se contempla en la simulación está basado en el transporte nacional por carretera con un elevado número de orígenes y destinos. Además, se le aplicarán restricciones en la ventana temporal de carga y descarga tanto en origen como en destino así como en la capacidad de los vehículos.

1.2 Alcance

En el presente proyecto se va a realizar un trabajo de investigación sobre *el problema de planificación de rutas* de transporte de larga distancia por carretera, con el propósito de optimizar los recursos.

Para ello, se va a realizar un estudio de la situación actual del transporte nacional de mercancías. En este estudio se analizarán los flujos de mercancía existentes entre provincias españolas y se seleccionarán los nodos o puntos de origen-destino que se utilizarán en la simulación.

Tras el estudio de la situación actual se realizará una simulación del transporte de mercancías entre los puntos de origen-destino seleccionados utilizando 4 técnicas de distribución. Las dos primeras técnicas son las denominadas técnicas puras. En el primer caso, todos los envíos se realizarán de forma directa entre cada par de origen-destino. En el segundo caso, todos los envíos se realizarán a través de uno o dos *hubs*, según convenga. Las dos técnicas restantes son las llamadas técnicas mixtas. La primera de ellas está basada en la utilización de técnicas metaheurísticas, de forma que escoge el tipo de distribución pura que más convenga en cada envío. En el segundo caso se realizará una distribución Hub&Spoke modificada. Estos dos últimos casos serán explicados más adelante de forma detallada. Para cada una de las técnicas se estudiará el coste asociado, que será función de la distancia total recorrida, y la influencia de algunos parámetros característicos del problema.

Con los resultados obtenidos se determinará si la hipótesis lanzada de que las distribuciones mixtas son más ventajosas que las distribuciones puras es correcta para el problema objeto de estudio y bajo qué condiciones se puede realizar dicha afirmación.

1.3 Estructura del documento

El presente documento recoge el estudio realizado en este PFC y consta de dos partes. La parte principal o memoria y los anexos.

La memoria está dividida a su vez en 7 apartados. El primero de ellos está formado por una breve introducción a la temática del proyecto. En este capítulo están recogidos los objetivos del proyecto y el alcance, donde aparecen las etapas o tareas que se van a ir desarrollando para alcanzar los objetivos.

En el capítulo segundo, se hace un breve estudio del estado del arte en los aspectos más importantes para la comprensión del proyecto. En primer lugar aparece una breve reseña de la optimización combinatoria. A continuación se hace referencia al problema de ruteo de vehículos. Junto con esto, figuran explicadas las técnicas de distribución de mercancías, aspecto clave para la comprensión del objetivo del proyecto. Por último, aparece una explicación de las técnicas metaheurísticas, y más concretamente, del *algoritmo de colonia de hormigas*, técnica empleada para la resolución del problema planteado en este PFC.

En el capítulo tercero, se describirá el problema objeto del proyecto. En este apartado se muestra una explicación de los medios utilizados para la consecución de los objetivos marcados, las restricciones aplicadas al problema y el diseño de los ensayos con los que se realizará la simulación de los envíos de mercancías.

En el siguiente capítulo aparece explicada la metodología utilizada, un análisis previo de la simulación, los resultados obtenidos y un análisis de las distintas estrategias a partir de los resultados.

En el capítulo quinto, se presentan las conclusiones obtenidas tras el estudio del problema y unos planteamientos para la continuación de los estudios en esta materia.

Por último, aparece la bibliografía utilizada durante la realización de este PFC y un índice de todas las tablas y figuras que aparecen en la memoria.

En la segunda parte del proyecto, los anexos, se explican algunos aspectos complementarios a la memoria para una mejor comprensión del trabajo realizado junto con los datos de todas las simulaciones y análisis realizados.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Optimización combinatoria. NP-Hard

La optimización combinatoria es una rama de la matemática discreta orientada a la resolución de problemas que involucren hallar el óptimo de una función sobre un conjunto discreto.

Cuando se trata la resolución de estos problemas, se puede notar que no todos presentan el mismo grado de dificultad. De este tema trata la *complejidad computacional*, que establece una clasificación de los distintos tipos de problemas por su grado de dificultad de acuerdo con la complejidad computacional del algoritmo más sencillo que permite asegurar su resolución.

A grandes rasgos, los problemas se pueden clasificar en dos grandes conjuntos: los tratables y los intratables. Los problemas intratables incluyen los que son formalmente indecidibles [1], para los que existe una demostración de que no existe ningún algoritmo que permita resolverlos en todos los casos. Los problemas intratables también incluyen todos aquellos problemas para los que sí se conoce un algoritmo que podría resolverlos pero para los que la cantidad de tiempo computacional necesaria para hacerlo los convierte realmente en inabordables, incluso para tamaños razonables de los mismos. Y ello, es independiente de la capacidad computacional de que se disponga. Formalmente se puede decir que no existe ningún algoritmo que permita resolverlo en un número de pasos que sea una función polinomial del tamaño de entrada del problema.

Un problema tratable, denominado problema de *clase P*, es un problema que se puede resolver siempre utilizando un algoritmo que conlleva un número de pasos que es función polinomial del tamaño de entrada del problema.

En resumen, se puede decir que los problemas de la *clase P* se pueden resolver en tiempo polinomial y los intratables no se pueden resolver en tiempo polinomial.

Adicionalmente, se puede establecer una clasificación adicional para aquellos problemas decidibles pero intratables, para los que al menos existe la posibilidad de calcular, en un número de pasos que es función polinomial del tamaño del problema, si

una solución pertenece a las soluciones del mismo. Estos problemas forman la *clase NP*. Los problemas de la *clase NP* son los que se pueden resolver utilizando una máquina imaginaria llamada máquina de Turing no determinista (NDTM, Non-Deterministic Turing Machine), en un número de pasos polinomial.

De todos los problemas de la *clase NP* se puede distinguir un conjunto de ellos denominado *NP-complete*, que son los más difíciles de resolver. El Teorema de Cook [2] nos permite determinar si un determinado problema *NP* pertenece a la *clase NP-complete*. La propiedad de la *clase NP-complete* es que todo problema de la *clase NP* se puede transformar polinomialmente en él.

Sin embargo, los problemas de optimización no se encuentran, en general, en la *clase NP* y, por tanto, puede que no sean *NP-complete*. Es así porque, generalmente, no es posible comprobar si se ha conseguido una solución óptima en un número de pasos que sea función polinomial del tamaño del problema. En la mayoría de los casos sólo es posible comprobarlo comparándola con todo el conjunto de soluciones del problema. Si el conjunto de soluciones crece exponencialmente con el tamaño del problema resulta evidente que la comprobación no se puede llevar a cabo en tiempo polinomial. Estos problemas de optimización se encuentran en una clase de problemas que se denominan *NP-hard*.

De todo lo dicho anteriormente resulta indiscutible que para los problemas de optimización *NP-hard* no existe ningún algoritmo en tiempo polinomial que permita determinar la solución óptima al problema. Por ello se utilizan métodos aproximados mediante *técnicas heurísticas* que permiten aproximarse a una solución óptima, generando soluciones factibles al problema que resulten de utilidad práctica. Este es el caso que ocupa a este PFC.

2.2 VRP (Vehicle Routing Problem)

El *problema de ruteo de vehículos* es el nombre genérico dado a la clase de problemas en los que se debe planificar una serie de rutas para una flota de vehículos apoyados en uno o más *hubs*, para un cierto número de nodos o clientes geográficamente dispersos. Es uno de los problemas de optimización computacional y programación no lineal (pertenece al tipo *NP-Complete*, [3]) más complejos y está comúnmente presente en aplicaciones industriales.

El tiempo y esfuerzo computacional requerido para resolver este problema aumenta exponencialmente con el número de nodos o clientes a considerar. Para este tipo de contingencias es a menudo deseable obtener soluciones aproximadas, para que puedan ser encontradas en un tiempo computacional razonable y que sean suficientemente exactas para su propósito. Usualmente esta tarea es lograda usando varios métodos heurísticos, que dependen de cierta visión interna de la naturaleza del problema.

En la práctica, en los VRP aparecen una serie de restricciones que generan variantes del problema original. Algunas de ellas, junto con el modelo matemático general del VRP, están explicadas en el Anexo I del PFC.

Dependiendo de los valores dados a los parámetros del problema, la solución para el problema VRP se puede obtener mediante técnicas exactas, heurísticas y metaheurísticas. Dentro de las aproximaciones exactas se encuentran la ramificación y acotamiento, ramificación y corte, programación dinámica y programación lineal entera. Dentro de las técnicas heurísticas se encuadran los métodos de construcción, el algoritmo de 2 fases y el algoritmo de mejora iterativa. Entre los metaheurísticos aparecen los algoritmos de colonia de hormigas, programación restringida, recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú y redes neuronales. Dependiendo de las condiciones del problema se escoge el método a utilizar. Debido al alto número de nodos considerados en el PFC, para la resolución del problema se utilizarán técnicas metaheurísticas, y más concretamente, el algoritmo de colonia de hormigas.

2.3 Estrategias de distribución

Según el *National Council of Physical Distribution Management* (1978) la distribución es un término empleado en la producción y en el comercio para describir la extensa variedad de actividades relacionadas con el movimiento de los productos terminados, desde el final de la fabricación hasta el consumidor y que, ocasionalmente, incluye el traslado de materias primas desde las fuentes de suministros hasta la línea de producción. Para transportar esta mercancía se usa una gran variedad de modo de transportes y puede realizar varias paradas en almacenes o nodos de cambio modal hasta llegar a su destino final.

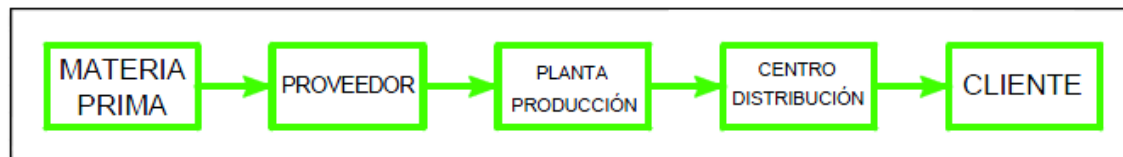


Figura 2.1 Esquema de red de distribución. Fuente: National Council of Physical Distribution Management (1978)

2.3.1 Estrategias puras

Según Estrada, [4], dentro de la ingeniería del transporte y la logística, existen 3 tipologías básicas de redes de distribución, según la mercancía, el modo de transporte o la disposición de los puntos generadores de demanda. Estas 3 tipologías son el *peddling*, el *many-to-many* y el H&S (Hub&Spoke).

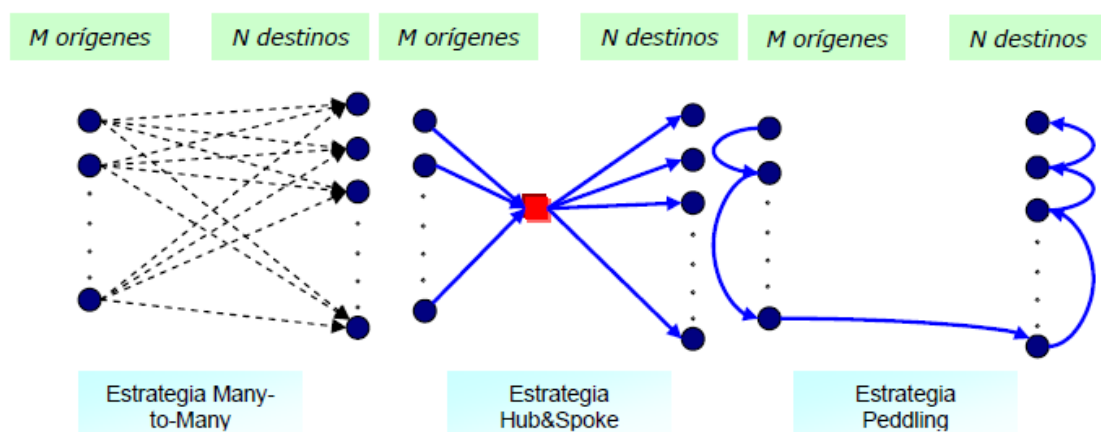


Figura 2.2. Estrategias básicas de distribución. Fuente: Estrada (2007)

- Envíos directos (many-to-many): se considera una estrategia muy “primitiva”, en la que todos los orígenes de la red están conectados con todos los destinos, y se sirven directamente. Ello comporta un alto número de rutas y, por tanto, un alto número de vehículos necesarios. Esta estrategia se utiliza en los casos en los que los costes que se desprenden de los vehículos que sirven los envíos son muy bajos o si los puntos de demanda son lo suficientemente potentes como para llenar los vehículos de distribución. Otra posible aplicación sería para equipos de emergencia, en el que el tiempo de entrega tiene un carácter crucial.

- Envíos Hub&Spoke: La estrategia H&S se caracteriza por la existencia de centros de consolidación de carga, *hubs*, donde la carga se manipula, se clasifica y se agrupa para distribuirla en otras rutas. Con esta estrategia se consigue el incremento de la frecuencia de los transportes, el incremento del factor de carga de los vehículos y con ello, se reduce el coste unitario del transporte a nivel general de la red de distribución.
- Envíos con paradas múltiples (Peddling): El peddling se caracteriza por una estructura con un número reducidas de rutas compuestas por un alto número de paradas en cada una de ellas. Aplicada bien, es flexible, en el sentido que a una ruta se le pueden asignar paradas cercanas sin un coste excesivo. Es una estrategia indicada para escenarios donde el coste y el tiempo de realizar una parada adicional en una ruta son reducidos y en escenarios con costes de servicio de vehículo relativamente altos. Se suele aplicar esta tipología de redes a servicios de correos y paquetería, o a paradas de líneas de autobús urbano.

2.3.2 Estrategias mixtas

Las estrategias descritas en el apartado anterior no tienen que seguirse de manera cerrada, sino que admiten fusiones y mezclas de propiedades de tipologías de redes distintas. Este es el caso de la planificación de redes de distribución que se estudia en este PFC.

Con las estrategias mixtas se puede unir la estrategia H&S con el concepto de *routing* característico del *peddling*. Así se permiten paradas intermedias en el trayecto entre el origen y el *hub* o entre el *hub* y el destino y en las rutas directas.

En las estrategias mixtas propuestas en este PFC, se escoge una estrategia de distribución pura para cada envío en función del coste asociado. Esto implica un mayor esfuerzo en la planificación, pero se pueden obtener mejores resultados.

2.4 Técnicas metaheurísticas

Para la optimización de problemas y cálculos de alta complejidad se han desarrollado múltiples técnicas y métodos. Estas técnicas de optimización se pueden clasificar en técnicas exactas y en técnicas aproximadas.

Las técnicas exactas garantizan encontrar la solución óptima de cualquier problema. Serían los métodos idóneos si no tuvieran el inconveniente de la cantidad de tiempo necesario para la resolución. El tiempo crece exponencialmente con el tamaño del problema, en el caso de este PFC con el número de nodos o clientes a considerar.

Las técnicas aproximadas sacrifican la garantía de lograr el resultado óptimo a cambio de obtener una buena solución en un tiempo razonable. Se han venido desarrollando durante los últimos 30 años y se distinguen tres tipos: métodos constructivos, métodos de búsqueda local y las técnicas metaheurísticas.

Los métodos constructivos suelen ser los más rápidos. Partiendo de una solución vacía, a la que se le va añadiendo componentes, generan una solución completa. Las soluciones ofrecidas suelen ser de muy baja calidad.

Los métodos de búsqueda local usan el concepto de vecindario y se inician con una solución completa inicial, recorriendo parte del espacio de búsqueda hasta encontrar un óptimo local.

Las técnicas metaheurísticas son algoritmos no exactos. Se fundamentan en la combinación de diferentes métodos heurísticos a un nivel más alto, para conseguir una exploración del espacio de búsqueda más eficaz y eficiente.

Una heurística es una técnica que busca soluciones buenas (óptimas o casi óptimas) a un coste computacional razonable, aunque sin garantizar la factibilidad de las mismas. En algunos casos ni siquiera puede determinar la cercanía al óptimo de una solución factible, [5].

Glover introduce por primera vez el término de metaheurística en [6], y define las metaheurísticas como métodos que integran, de diversas maneras, procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio de búsqueda. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales, especialmente en espacios de búsqueda complejos.

En el anexo II aparece una clasificación de las técnicas metaheurísticas.

2.4.1 Colonia de hormigas

En ciencias de la computación y en investigación operativa, el algoritmo de la colonia de hormigas, algoritmo hormiga u optimización por colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization*, ACO) es una técnica probabilística para solucionar problemas computacionales que pueden reducirse a buscar los mejores caminos o rutas en grafos.

Los algoritmos de optimización de colonias de hormigas pertenecen al grupo de las técnicas metaheurísticas, y son aplicados en muchos algoritmos de optimización combinatorios. Es el caso de este PFC, que utiliza el algoritmo de colonia de hormigas para la resolución del problema.

Inicialmente propuesto por Marco Dorigo [7] en su tesis doctoral, el primer algoritmo surgió con el objetivo de buscar el camino óptimo en un grafo, basado en el comportamiento de las hormigas cuando estas están buscando un camino entre la colonia y una fuente de alimentos.

La idea original proviene de la observación de la explotación de los recursos alimentarios entre hormigas. Las habilidades cognitivas de estos insectos son individualmente limitadas y en conjunto son capaces de buscar el menor camino existente entre la fuente de comida y su nido o colonia.

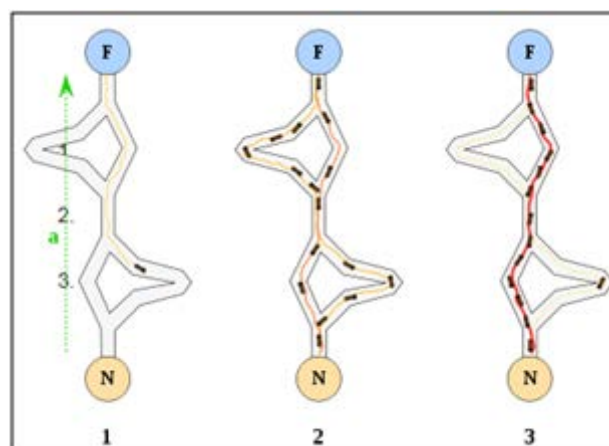


Figura 2.3. Colonia de hormigas

La primera hormiga encuentra la fuente de alimentos (F) a través de cualquier camino (a), entonces retorna a la colonia (N), dejando tras sí un rastro de feromonas. Las hormigas, indiscriminadamente, siguen cuatro caminos posibles, pero el

fortalecimiento de la pista hace más atractivo la ruta más corta. Las hormigas toman la ruta más corta y largas porciones de otras rutas empiezan a perder su rastro de feromonas.

Este sistema está basado en la retroalimentación positiva (el depósito de feromonas atrae otras hormigas y estas fortalecerán dicha retroalimentación) y la retroalimentación negativa (disipación de la ruta por evaporación). Teóricamente, si la cantidad de feromonas fuese la misma en todas las rutas durante todo el tiempo, ninguna ruta sería elegida. Sin embargo, debido a la retroalimentación, una ligera variación en una arista amplificará la concentración de feromonas y entonces se permitirá elegir una ruta. El algoritmo se moverá de un estado inestable en el que ninguna arista es más fuerte que otra, a un estado estable donde una ruta está compuesta por las aristas más fuertes.

De esta manera, cada hormiga construye una solución del problema. Cuando una hormiga completa una solución, el resto de hormigas evalúa dicha solución y modifican el valor de la ruta sobre las componentes utilizadas por la primera hormiga. Esta información de feromonas dirigirá la búsqueda de futuras hormigas. La evaporación del rastro reduce todos los valores de los rastros evitando la posibilidad de caer en óptimos locales. La formulación matemática de este algoritmo aparece en el Anexo III.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Introducción

El objetivo de este PFC es validar si una estrategia de distribución mixta en el envío de mercancías es más ventajosa que las estrategias de distribución puras. El trabajo se centra en el transporte de larga distancia de mercancía paletizada dentro del territorio español. En el escenario que se plantea existen 2 *hubs*, uno situado en Zaragoza y otro en Alcobendas (Madrid).

En el proyecto se estudian 4 tipos de estrategias diferentes para la distribución de mercancías. Dos de ellas corresponden a estrategias puras y las otras dos corresponden a estrategias mixtas. En el primer caso, se realizará una simulación de estrategia pura, donde todos los envíos se realizan de forma directa entre cada par de origen-destino (*many to many*).

A continuación se realizarán las simulaciones de las dos estrategias mixtas. En el primer caso, se utiliza una técnica heurística para asignar el tipo de distribución adecuado a cada envío. En el segundo caso, se sigue una estrategia *Hub&Spoke modificada*. La metodología de ambas técnicas mixtas está explicada en el apartado 4.3 Metodología.

Por último, se simulará siguiendo una estrategia pura, donde todos los envíos se realizan a través de los centros de rotura y consolidación de carga (*Hub&Spoke*).

Los problemas asociados a las redes de distribución requieren decisiones complejas con un gran número de variables y restricciones, que incluso en problemas pequeños provocan que los tiempos de cálculo para considerar todos los resultados posibles sean inabordables. Es por eso que se han diseñado técnicas y procedimientos eficientes para encontrar soluciones óptimas o, muy cercanas a las óptimas, utilizando métodos heurísticos y metaheurísticos.

Debido al gran número de nodos o clientes considerados y de la complejidad de las restricciones impuestas, para el desarrollo del proyecto se evaluó y colaborado en la creación de una herramienta informática que se basa en técnicas metaheurísticas, en concreto en el algoritmo de colonia de hormigas, para encontrar la solución al problema con las características descritas.

Con el objetivo de evaluar la herramienta informática y analizar los resultados que permitan extraer las conclusiones, se ha diseñado una serie de simulaciones con distinto número de órdenes de envío o tamaño del problema, como se explica más adelante. Con esta simulación se conocerán los resultados económicos asociados a cada una de las estrategias de distribución y la influencia de algunos parámetros en los resultados del problema.

3.2 Restricciones

La función objetivo planteada para resolver el problema es minimizar el coste del transporte. Para ello se ha considerado que el coste es proporcional a la distancia recorrida por los vehículos. En la solución final, la variable coste aparecerá como la suma de las distancias recorridas por todos las rutas.

Para obtener una solución factible en la realidad, a la función objetivo se le han impuesto las siguientes restricciones:

- Toda la mercancía es paletizada.
- C_{max} , capacidad máxima de un vehículo: 33 palés
- La suma de los palés de una ruta no puede superar C_{max} .
- La utilización de *hubs* no conlleva gastos económicos.
- La capacidad de los *hubs* es infinita.
- Se debe llegar por debajo del límite superior de la ventana temporal.
- No se penaliza el tiempo de espera.
- Velocidad promedio: 70 km/hora. La velocidad media considerada en [8] para vehículos de carga está entre 75 y 80 km/h. En este estudio se toma una velocidad inferior debido a que se consideran distancias euclídeas, que son inferiores a las distancias reales recorridas por el vehículo.
- Se seguirá la política LIFO (*Último en entrar será primero en salir*).

Tras realizar los primeros ensayos, se observó que se obtenían soluciones factibles pero carentes de sentido en la práctica, ya que se producían agrupaciones de ruta erróneas. Una ruta agrupada es aquella que junta dos o más órdenes de envío. La solución planteada en un principio agrupaba envíos con nodos situados en zonas alejadas entre sí. Como consecuencia, la ruta resultante realizaba recorridos que conllevaban un alto coste. Este problema mostró la necesidad de estudiar cómo delimitar las órdenes que se debían agrupar en una sola ruta. Tras la revisión de la

literatura [9] y con la colaboración de Beatriz Royo, se propuso que la agrupación de dos o más envíos distintos en uno solo, se pueda realizar en los casos que los orígenes y los destinos se encuentren dentro de una elipse formada por el origen y destino o, en el caso de utilización de *hub*, entre el nodo y dicho *hub*. Para hallar el valor del eje menor b , se ha considerado que sea $(1/m)*a$, siendo $m>1$. En este caso se ha dado el valor $m=2$, resultando $b=a/2$.

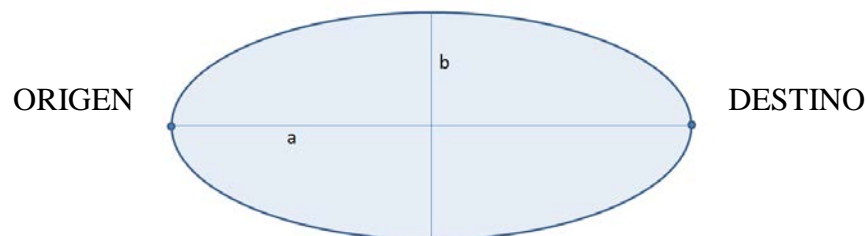


Figura 3.1. Elipse de agrupación de nodos.

En las figuras 3.2 y 3.3 aparecen dos casos en los que se muestra cuándo es posible la agrupación de envíos. En el primer caso, se realizan los envíos A-A', B-B' y C-C' a través de un *hub*. Se observa que los envíos desde los orígenes A y B al *hub* se encuentran dentro de la misma elipse. Así pues, estos envíos pueden ser agrupados en uno solo. Lo mismo ocurre con los envíos desde el *hub* hasta los destinos B' y C'. En los recorridos entre el origen C y el *hub* y entre el *hub* y el destino A', no se encuentra ningún nodo dentro de la elipse, con lo que no pueden ser agrupados con ningún otro envío.

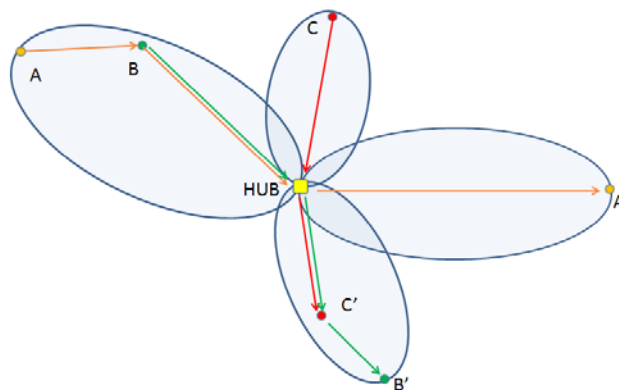


Figura 3.2. Elipses de agrupación envíos a través de HUB.

En el segundo caso, se muestran los envíos directos A-A', B-B' y C-C'. Se observa que el origen y el destino del envío B-B' se encuentra dentro de la elipse formada por los nodos del envío A-A', así que estos dos envíos pueden ser unidos en uno solo. Sin embargo, el destino del envío C-C' no pertenece a esta elipse, por consiguiente, el envío no podrá ser realizado junto con ninguno de los otros dos envíos.

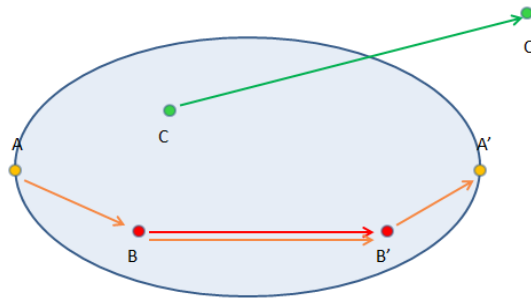


Figura 3.3. Elipse de agrupación de envíos directos.

3.3 Diseño de experimentos

Para alcanzar el objetivo del PFC se han planteado unas simulaciones para comprobar, como se ha comentado, si una estrategia de distribución mixta es más ventajosa que las técnicas puras y bajo qué condiciones.

Para comenzar, se han generado una serie de órdenes de distribución entre distintas provincias de forma aleatoria, basándose en el estudio realizado de flujo de mercancías, explicado en el anexo IV. En la generación de órdenes no se han tenido en cuenta los envíos dentro de cada Comunidad Autónoma, ya que éstos centran la mayor cantidad de mercancía transportada y el marco del proyecto se centra en el transporte de larga distancia. El número de órdenes que se van a estudiar serán 5, 25, 50, 100 y 250.

Con el fin de realizar una simulación más cercana a la casuística real, para cada estrategia y número de órdenes mencionados anteriormente, se han utilizado unos parámetros para observar la influencia que tienen en el resultado final. Estos parámetros se encuentran resumidos en la tabla 3.1.

En primer lugar se ha variado la posibilidad de espera o no antes de las operaciones de carga y descarga. En segundo lugar se ha variado el tiempo que transcurre entre las ventanas temporales de recogida y de entrega de mercancía de una orden. Las ventanas temporales son los períodos de tiempo en los que se puede producir las operaciones de carga y descarga de la mercancía. En todas las simulaciones la amplitud de las ventanas temporales de recogida y de entrega es de 300 minutos. En la primera opción que se va a simular, se ha establecido que el tiempo entre el fin de la ventana temporal de recogida de material y el comienzo de la ventana temporal de entrega de material sea grande. En este caso, esa diferencia es fija para todas las órdenes y toma un valor de 720 minutos. Se corresponde con un servicio donde la entrega se realiza 24 horas más tarde que la recogida.

En la segunda opción, la ventana temporal de recogida en origen es igual que en el caso anterior, mientras que en el caso de descarga en destino las ventanas son variables para cada envío. Estas se calculan sumando el tiempo necesario para realizar el recorrido entre origen y destino. Este caso se corresponde con un envío urgente que tiene una tiempo muy ajustado. En la tercera opción se realizará la simulación asignando de manera aleatoria una opción u otra a cada envío.

Por último, se ha estudiado la influencia de la dispersión geográfica. Para ello, se han realizado simulaciones considerando solo 3 provincias distantes entre sí, como son Huelva, Lugo y Valencia, o considerando 21 provincias peninsulares. El motivo de seleccionar estas tres provincias es, por una parte, comprobar de forma más sencilla que el algoritmo desarrollado proporciona resultados esperados y subsanar los posibles errores y por otra parte, comprobar la influencia de la dispersión de los nodos.

Estos parámetros influyen en la agrupación de envíos debido a que las restricciones temporales permiten o impiden la agrupación de varias órdenes de envíos en una sola ruta.

Parámetros	
Número de órdenes	5
	25
	50
	100
	250
Estrategia	Directa pura
	Hub&Spoke modificado
	Heurística
	Hub&Spoke pura
Espera	Sí
	No
Ventana horaria	Amplia
	Estrecha
	Mixta
Dispersión geográfica	3 provincias
	21 provincias

Tabla 3.1. Parámetros de simulación

4. ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN

4.1 Introducción

Durante la realización de este PFC, se va a realizar un estudio para conocer la influencia de variar los parámetros del problema: tamaño, permiso de espera, diferencia temporal entre la recogida y la entrega y dispersión geográfica. El ensayo se realizará para distintos tamaños del problema: 5, 25, 50, 100 y 250 órdenes de envío, generando dos casos para cada valor, uno con dispersión de los nodos en 3 provincias y otro en 21 provincias. Para dotar de una mayor validez al estudio cada simulación se repetirá 3 veces.

Con la variación de la espera y la diferencia de la ventana, aparecen 6 combinaciones distintas que se van a simular y que aparecen en la siguiente tabla:

	Espera	Diferencia temporal
Combinación 1	Sí	Grande
Combinación 2	No	Grande
Combinación 3	Sí	Ajustada
Combinación 4	No	Ajustada
Combinación 5	Sí	Mixta
Combinación 6	No	Mixta

Tabla 4.1. Combinaciones de simulación

4.2 Agrupación de rutas

Para todos los casos se va a representar el coste, calculado como suma del coste de transporte de cada orden de envío, y el porcentaje de rutas agrupadas asociado a cada combinación. Como se ha comentado, una ruta agrupada es aquella que junta dos o más órdenes de envío. Para que en una misma ruta se agrupen más de una orden de envío, tiene que cumplirse las siguientes restricciones:

1. La capacidad disponible debe ser mayor o igual a la suma de las cargas de las órdenes de envío.
2. Los nodos de origen-destino deben estar en las proximidades de la línea que une los extremos de la ruta. (Ver apartado 3.2 *Restricciones*)
3. Se deben cumplir las restricciones temporales en la llegada de cada envío.

4.3 Metodología

La metodología para las distintas estrategias que se estudian en este PFC es la siguiente:

- Estrategia directa pura: Se asigna a todos los envíos una estrategia directa pura. Si dos o más envíos cumplen las condiciones mencionadas en el apartado 4.2, se unirán en una misma ruta.
- Estrategia mixta de Hub&Spoke modificada: Inicialmente se asigna a todos los envíos una estrategia de distribución de Hub&Spoke y su recorrido se divide en dos o tres tramos, dependiendo de si les han sido asignado uno o dos *hubs*. Es decir, el recorrido total del envío se dividiría en los recorridos desde el origen al *hub*, desde el *hub* al destino y, en el caso de utilización de dos *hubs*, en el recorrido entre los dos *hubs*. En el caso de que en ninguno de los tramos se asocie con otra orden, los envíos cambiarán a una estrategia de envío directo.
- Estrategia mixta por técnicas heurísticas: Inicialmente se asigna a todos los envíos una estrategia de distribución directa. Posteriormente, a aquellos envíos cuyos nodos no cumplan uno de los esquemas que aparecen en la figura 4.1, se les asignará al menos un *hub*. También se le asignará un *hub* en el caso de que cumpliendo los esquemas que aparecen en la figura 4.1, la distancia entre los nodos de origen y destino se encuentren más alejados de 150 km. Las rutas resultantes que cumplan las condiciones mencionadas en el apartado 4.2, serán unidas en una misma ruta.

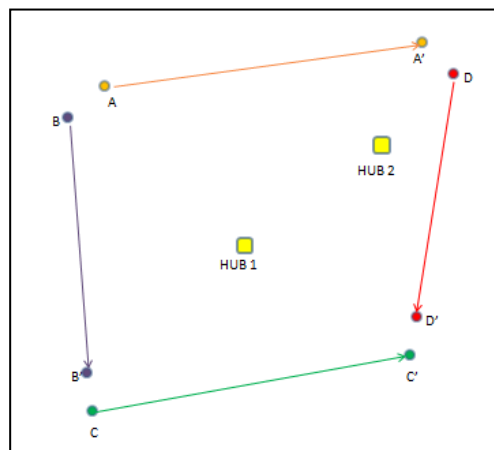


Figura 4.1. Regla de la estrategia heurística

- Estrategia Hub&Spoke pura: Se asigna a todos los envíos una estrategia de Hub&Spoke, asignando al menos un *hub* a cada envío. Si dos o más envíos cumplen las condiciones mencionadas en el apartado 4.2, se unirán en una misma ruta.

4.4 Análisis previos de agrupación

Como paso previo a las simulaciones, se analiza en cada combinación el resultado esperado para cada estrategia de envío.

ESTRATEGIA		DIRECTA PURA
Ventana Amplia	No espera	Con una estrategia de envío directa y una ventana amplia, aunque las rutas consten de una sola orden de envío, llegarán a destino antes del inicio de la ventana de entrega. Se producirá una espera obligada para todas las órdenes. Si se agruparan más de una orden de envío en una ruta la espera sería mayor. Por esta razón, todos los envíos se realizarán sin agruparse.
	Espera	Al existir un margen amplio entre las recogidas y las entregas y permitir espera, todas las órdenes que cumplan las condiciones 1 y 2 mostradas anteriormente se podrán juntar en una misma ruta
Ventana Reducida	No espera	En el caso de que la diferencia entre las ventanas temporales sea reducida, la agrupación se producirá si los nodos de origen y los de destino se encuentran cercanos. La agrupación se verá favorecida por la concentración de nodos en 3 provincias y por el aumento del número de nodos.
	Espera	Como la limitación temporal es grande, las rutas no llegarán a destino antes de la ventana de entrega y no se producirá espera, así que aunque se permita la espera, no se aumentará la agrupación de rutas.
Ventana Mixta	No espera	La posibilidad de agrupación dependerá de la ventana asignada a las órdenes que cumplan las condiciones 1 y 2. Si órdenes que cumplen esas restricciones tienen ventanas amplias y permiten espera se agruparán. En caso de que no se permita espera, no se agruparán. En caso de que sea asignada la ventana ajustada, la posibilidad de agrupación se reduce, y será independiente de si se permite espera o no
	Espera	

Tabla 4.2. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío directa pura

ESTRATEGIA		HUB & SPOKE
Ventana Amplia	No espera	Se espera que la agrupación sea alta ya que el momento de salida del <i>hub</i> se calcula en función del fin de la ventana temporal en el nodo de entrega. Debido a la amplitud de ventana, el tiempo para pasar incluso por ambos <i>hubs</i> es suficiente.
	Espera	La agrupación será similar a la anterior, o superior al relajar las restricciones.
Ventana Reducida	No espera	En el caso de que la ventana sea ajustada y no se permita espera, la agrupación será mínima o nula. En todo caso, se espera que sea asignado como máximo un <i>hub</i> a cada ruta.
	Espera	Caso similar al anterior, pero al permitir espera se posibilitará alguna agrupación más.
Ventana Mixta	No espera	Sucederá lo mismo que para la estrategia directa pura. La posibilidad de agrupación dependerá de la ventana asignada a las órdenes que cumplan las condiciones 1 y 2. Si órdenes que cumplen esas restricciones tienen ventanas amplias y permiten espera se agruparán. En caso de que no se permita espera, no se agruparán. En caso de que sea asignada la ventana ajustada, la posibilidad de agrupación se reduce, y será independiente de si se permite espera o no.
	Espera	

Tabla 4.3. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío HUB&SPOKE

ESTRATEGIA		HUB & SPOKE MODIFICADA
Ventana Amplia	No espera	En un principio la agrupación será como en el caso de Hub&Spoke, pero si alguna orden no es agrupada en algún tramo de la ruta, la estrategia pasará a directa pura. Entre todas las órdenes que pasen a una estrategia directa pura se espera que no sean agrupadas
	Espera	Igual que en el caso anterior, pero la posibilidad de agrupación aumentará en las órdenes con estrategia directa al permitir la espera.
Ventana Reducida	No espera	El tiempo de paso por un <i>hub</i> y por más de un nodo hace que se pueda sobrepasar el límite superior de la ventana temporal y que no se puedan agrupar. En ese caso, se pasará a una estrategia directa y la agrupación de las órdenes con estrategia directa será similar independientemente si se permite espera o no.
	Espera	
Ventana Mixta	No espera	Como en las estrategias anteriores, la agrupación dependerá de la ventana asignada a las rutas que cumplen las primeras condiciones. El resultado será rutas que pasen solo por un <i>hub</i> o rutas directas
	Espera	

Tabla 4.4. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío HUB&SPOKE
Modificada

ESTRATEGIA		HEURÍSTICA
Ventana Amplia	No espera	Las órdenes a las que se les asigna la estrategia directa, tanto inicialmente como a lo largo del algoritmo, no serán agrupadas mientras que a las que se les asigna una estrategia de Hub&Spoke tienen gran probabilidad de ser agrupadas en alguno de sus tramos.
	Espera	Al permitir la espera, las órdenes a las que se les asigna estrategia pura pueden ser agrupadas. Igualmente, las órdenes con Hub&Spoke tienen una gran probabilidad de ser agrupadas.
Ventana Reducida	No espera	Similar al caso anterior. Inicialmente se partirá de un número mayor de órdenes con estrategia directa al aplicar la regla, pero finalmente al no poderse agrupar las órdenes con estrategia Hub&Spoke en ninguno de sus tramos pasan también a directas, permitiendo una mayor agrupación de esta forma.
	Espera	
Ventana Mixta	No espera	Como en las estrategias anteriores, la agrupación dependerá de la ventana asignada a las rutas que cumplen las primeras condiciones. El resultado será rutas que pasen solo por un <i>hub</i> o rutas directas.
	Espera	

Tabla 4.5. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío heurística

Los resultados generales de agrupación esperados, expuestos en las tablas anteriores, estarán sujetos a cierta aleatoriedad debido a la generación aleatoria de nodos. Si la dispersión de los nodos se encuentra concentrada en pocas zonas, la probabilidad de unión será mucho mayor. Además, la estrategia directa obtendrá mejores valores. Conforme aumente el número de nodos la influencia de la dispersión será menos notoria.

En general, se espera que las estrategias mixtas, la heurística y la Hub&Spoke modificada, presenten unos mejores resultados tanto en coste como en agrupación de rutas y que las estrategias puras, la directa pura y la de Hub &Spoke, sean más beneficiosas cuando se den unas condiciones específicas.

4.5 Resultados generales

En la tabla 4.6, que se muestra a continuación, aparecen los resultados obtenidos en las simulaciones. Tanto el dato de los costes como el de porcentaje de agrupación refleja una media de las tres simulaciones que se han realizado para cada caso.

				5 órdenes				25 órdenes				50 órdenes				100 órdenes				250 órdenes			
				3 provincias		21 provincias		3 provincias		21 provincias		3 provincias		21 provincias		3 provincias		21 provincias		3 provincias		21 provincias	
	Espera	Ventana	Estrategia	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup	Coste	% rutas agrup
Comb. 1	Sí	Grande	DIR.	2845,0	0,39	2547,7	0,08	8948,7	0,6	12568,0	0,4	15771,0	0,64	17928,7	0,49	30613,7	0,67	40041,0	0,54	71162,3	0,76	87685,7	0,57
	Sí	Grande	H&S MODIF	2206,0	0,66	2597,7	0,24	9581,3	0,74	13296,3	0,65	18154,0	0,71	18807,0	0,73	32006,0	0,76	41357,0	0,68	80254,3	0,70	84931,0	0,79
	Sí	Grande	HEUR	2206,0	0,66	2514,0	0,19	9663,7	0,78	12765,3	0,43	18773,3	0,69	18476,7	0,48	31535,7	0,77	41069,7	0,55	79079,7	0,73	83880,7	0,61
	Sí	Grande	H&S	2283,3	0,63	2803,7	0,21	9537,3	0,77	13740,0	0,63	17652,7	0,72	18327,7	0,81	31579,7	0,8	40711,0	0,7	79068,7	0,74	92856,0	0,69
Comb. 2	NO	Grande	DIR.	3230,3	0	2726,7	0	16492,3	0	15058,3	0	32575,0	0	24318,0	0	65858,7	0	54199,0	0	164195,7	0,00	124497,7	0
	NO	Grande	H&S MODIF	2209,3	0,66	2541,7	0,24	9391,3	0,86	12955,3	0,62	18295,3	0,74	17434,7	0,73	32877,0	0,79	38571,7	0,83	86259,7	0,70	81353,0	0,88
	NO	Grande	HEUR	2202,7	0,66	2443,0	0,19	9332,0	0,81	12436,3	0,41	18050,3	0,76	17518,0	0,51	33572,3	0,77	39163,3	0,48	86851,7	0,69	81397,7	0,53
	NO	Grande	H&S	2283,3	0,63	2733,0	0,21	9443,0	0,81	13188,3	0,6	17837,3	0,77	17477,7	0,79	32193,3	0,8	40711,7	0,74	80167,7	0,75	93249,0	0,67
Comb. 3	Sí	Pequeña	DIR.	2636,7	0,31	2550,7	0,08	11011,0	0,56	15058,3	0	21664,0	0,59	23023,0	0,06	40941,3	0,71	52336,7	0,05	102737,0	0,70	115424,3	0,08
	Sí	Pequeña	H&S MODIF	2785,3	0,33	2550,7	0,08	12065,0	0,44	14923,0	0,1	23360,7	0,46	23108,3	0,18	46883,3	0,41	51073,3	0,19	116083,0	0,40	114775,3	0,16
	Sí	Pequeña	HEUR	2779,0	0,39	2550,7	0,08	11941,0	0,47	14894,0	0,08	23877,0	0,44	22677,7	0,14	46024,7	0,43	50199,0	0,17	116452,3	0,40	112709,7	0,16
	Sí	Pequeña	H&S	3602,0	0,16	3429,0	0	15450,0	0,22	18502,7	0,1	31574,7	0,21	29108,3	0,15	62792,7	0,19	59783,0	0,17	153549,7	0,20	146490,7	0,13
Comb. 4	NO	Pequeña	DIR.	2636,7	0,31	2547,7	0,08	9975,0	0,57	15058,3	0	19855,3	0,52	23011,0	0,06	33597,7	0,66	52180,0	0,04	85164,0	0,65	115105,0	0,07
	NO	Pequeña	H&S MODIF	2773,7	0,28	2550,7	0,08	9810,0	0,6	15021,0	0,05	19029,7	0,52	22773,0	0,12	36335,0	0,55	51767,7	0,12	91070,3	0,50	114064,7	0,13
	NO	Pequeña	HEUR	2773,3	0,28	2550,7	0,08	9992,7	0,58	15025,0	0,03	19190,0	0,46	22892,3	0,09	36829,3	0,56	51284,0	0,12	89282,3	0,51	113125,3	0,15
	NO	Pequeña	H&S	3998,3	0,04	3429,0	0	17315,0	0,12	19189,0	0,04	36274,0	0,1	30943,3	0,06	73872,7	0,09	67805,0	0,05	194407,0	0,03	165156,7	0,04
Comb. 5	Sí	Mixta	DIR.	2449,0	0,31	2550,7	0,08	10259,0	0,6	14303,7	0,11	18453,3	0,66	22041,7	0,13	35506,0	0,66	44403,3	0,38	86940,3	0,79	93084,3	0,53
	Sí	Mixta	H&S MODIF	2895,0	0,31	2568,0	0,17	11651,3	0,47	14584,0	0,26	22703,7	0,5	22987,0	0,3	44099,7	0,49	49202,3	0,28	116025,0	0,40	113532,7	0,27
	Sí	Mixta	HEUR	2895,0	0,31	2778,0	0,09	11748,0	0,45	14068,3	0,22	23442,7	0,47	21676,0	0,22	44042,0	0,49	48579,7	0,29	112313,7	0,42	105425,3	0,34
	Sí	Mixta	H&S	3376,0	0,26	3195,3	0,07	13544,3	0,35	17186,3	0,21	27148,0	0,36	26782,0	0,24	53752,7	0,31	56158,0	0,27	132736,3	0,29	135163,7	0,22
Comb. 6	NO	Mixta	DIR.	3230,3	0	2726,7	0	14060,3	0,17	15058,3	0	29203,3	0,11	23621,3	0,03	50636,3	0,29	53929,3	0,01	149187,0	0,09	123877,0	0,01
	NO	Mixta	H&S MODIF	3100,3	0,21	2582,7	0,17	11205,0	0,6	14741,0	0,21	23251,3	0,45	22928,7	0,29	41576,0	0,52	48215,7	0,36	109274,0	0,46	113806,7	0,30
	NO	Mixta	HEUR	3100,3	0,21	2582,7	0,17	11092,7	0,62	14613,3	0,13	23052,7	0,46	22512,3	0,17	38730,0	0,55	48535,7	0,23	100045,7	0,52	113800,7	0,20
	NO	Mixta	H&S	3519,0	0,16	3195,3	0,07	16057,3	0,26	18281,3	0,12	30591,7	0,26	28049,7	0,22	63882,3	0,22	61284,3	0,18	158883,3	0,22	149490,0	0,16

Tabla 4.6. Resultados de simulación

4.6 Análisis de estrategias

Con los resultados obtenidos en la simulación que aparecen en la tabla 4.6 se han realizado las figuras que aparecen en el anexo V. En ellas aparecen los costes de transporte junto con los porcentajes de agrupación de las cuatro estrategias en cada combinación de parámetros de simulación, separado según el número de órdenes de envío, es decir, según el tamaño del problema. Para entender mejor el comportamiento de las estrategias mixtas, se acompaña las figuras con una tabla donde además del porcentaje de agrupación de rutas aparece el porcentaje de envíos directos que se realizan en las estrategias mixtas. En los casos en los que los envíos directos se vean beneficiados por las condiciones temporales, los resultados de las estrategias mixtas serán mejores cuanto mayor sea el porcentaje de envíos directos y, por el contrario, si las condiciones temporales perjudican el envío directo, los resultados de las estrategias mixtas serán mejores cuanto menor sea el porcentaje.

Apoyándose en los datos que aparecen en el anexo V se realiza un análisis del comportamiento de cada estrategia de distribución.

4.6.1 Estrategia directa pura

Diferencia de ventana amplia

La estrategia directa pura, bajo unas condiciones de diferencia de ventana amplia, depende en gran medida de si está permitida o no la espera. En caso de que sí lo esté, el porcentaje de agrupación será alto y aumentará conforme aumenta el tamaño del problema y la concentración de nodos, resultando una de las opciones más económica, superando a las demás técnicas. Sin embargo, si la espera no está permitida, el porcentaje de agrupación será nulo en todos los casos, como se ha comentado en la tabla 4.2 y resultará la estrategia más costosa. Este caso es uno de los más desfavorables del conjunto de combinaciones estudiadas.

No obstante, el caso de que se permita espera en el destino no suele ser usual, por lo que es una buena opción teórica, pero que no se llevaría a la práctica.

**DIFERENCIA AMPLIA Y SE PERMITE ESPERA → DIRECTA PURA MEJOR OPCIÓN.
IRREALIZABLE EN LA REALIDAD POR INEFICIENCIA**

Diferencia de ventana ajustada

En caso de que la diferencia entre las ventanas sea reducida, la estrategia directa pura obtiene buenos resultados tanto en coste como en porcentaje de agrupación, mejorando los obtenidos con las otras estrategias de distribución. Los resultados se ven favorecidos, como en el caso anterior, conforme aumenta el tamaño del problema y si los nodos se encuentran concentrados en 3 provincias.

DIFERENCIA VENTANA REDUCIDA → DIRECTA PURA MEJOR OPCIÓN

Diferencia de ventana mixta

La estrategia directa pura se ve favorecida cuanto mayor sea la concentración de nodos y si la espera está permitida. Esto es debido a que entre las órdenes a las que se les asigna aleatoriamente una diferencia entre ventanas amplia, hay un alto grado de agrupación, y la espera no afecta en gran medida a las órdenes a las que se les asigna una diferencia de ventana ajustada. Sin embargo, al igual de lo que se ha comentado antes, al permitir espera en el caso de envíos directos, resultan rutas irrealizables en la práctica.

DIFERENCIA VENTANA MIXTA Y SE PERMITE ESPERA → DIRECTA PURA LA MEJOR OPCIÓN. IRREALIZABLE EN LA REALIDAD POR INEFICIENCIA

4.6.2 Estrategia Hub&Spoke puraDiferencia de ventana amplia

Esta es la opción que más favorece a la estrategia de Hub&Spoke, independientemente del tamaño del problema, de la dispersión de nodos y de si está permitida la espera o no. Esto se debe a que la mercancía es almacenada en los almacenes intermedios hasta el momento en que se pueda realizar la entrega. Al dividirse los envíos en dos o tres rutas, en función de si se utiliza un *hub* o dos (*origen-hub*, *hub-origen* y, si procede, *hub-hub*) se produce una mayor agrupación de rutas.

DIFERENCIA AMPLIA → HUB&SPOKE MEJOR OPCIÓN.

Diferencia de ventana ajustada

Al contrario que en el caso anterior, esta opción es la más desfavorable. Si el tiempo de ruta es ajustado no será suficiente para que una ruta pase por un *hub* y se agrupe con otra ruta. Así, obligar a una ruta que solo lleva una orden de envío a pasar por un *hub*, aumenta los costes y la ineficiencia, independientemente del resto de parámetros.

DIFERENCIA AJUSTADA → HUB&SPOKE INEFICIENTE
Diferencia de ventana mixta

En caso de que se asigne un tipo de diferencia u otro a las órdenes, los resultados obtenidos por esta estrategia serán una ponderación de los casos anteriores. En cualquier caso, esta estrategia resultará más costosa que el resto de estrategias, ya que será difícil que se agrupen las órdenes que tengan una diferencia entre ventanas ajustada. En este caso, se incrementan los costes por hacer pasar una ruta con una sola orden a través de un *hub*, como en el caso anterior.

DIFERENCIA MIXTA → HUB&SPOKE INEFICIENTE

4.6.3 Estrategia mixtas: Hub&Spoke modificada y heurística

Diferencia de ventana amplia

Los resultados obtenidos por ambas técnicas en el caso de la diferencia entre las ventanas horarias sea amplia, se aproxima a los obtenidos con la estrategia de Hub&Spoke pura, ya que, como se ha comentado, estas condiciones benefician el paso por al menos un *hub*. En las técnicas mixtas, se contempla la posibilidad de que aquellas órdenes que no se agrupen en ningún trayecto (origen- *hub*, *hub-hub*, *hub-destino*) se conviertan en envíos directos. El porcentaje de estos envíos directos aparecen en las tablas adjuntas a los resultados del anexo V. Estos envíos, además de no ser viables no reducen el coste. El hecho de permitir espera o no, no afecta a los resultados.

DIFERENCIA AMPLIA → ESTRATEGIAS MIXTAS SE APROXIMAN A ESTRATEGIA HUB&SPOKE

Diferencia de ventana ajustada

En este caso, debido a las condiciones temporales ajustadas, no hay tiempo suficiente de pasar por los *hub* y agrupar más de una orden en una ruta, así que los resultados obtenidos por técnicas mixtas se aproximan a una estrategia de envío directo.

DIFERENCIA AMPLIA → ESTRATEGIAS MIXTAS SE APROXIMAN A ESTRATEGIA DIRECTA

Diferencia de ventana mixta

El escenario en el que una parte de las órdenes presentan una diferencia entre ventanas ajustada y otra parte de las órdenes presentan una diferencia entre ventanas amplia, es donde las técnicas mixtas obtienen mejores resultados que cualquiera de las estrategias puras. Las estrategias mixtas, asignan la estrategia de envío adecuada a cada envío, generando soluciones factibles y más económicas. Además, el hecho de que la espera no esté permitida, beneficia a las estrategias mixtas, ya que a las órdenes con una diferencia ajustada les asigna una estrategia de envío directa y a las que tienen una diferencia amplia, una estrategia de Hub&Spoke. Este escenario es el más cercano a la realidad, donde cada envío puede tener unas circunstancias temporales específicas.

DIFERENCIA MIXTA → ESTRATEGIAS MIXTAS MÁS EFICIENTES Y ECONÓMICAS. CASO MÁS PRÓXIMO A LA REALIDAD

4.7 Ratio estrategias puras - estrategias mixtas

El objetivo de este PFC es comprobar si las estrategias mixtas obtienen mejores resultados que las técnicas puras y bajo qué condiciones se cumple. En el apartado anterior se han analizado los resultados obtenidos por cada estrategia en función de los distintos parámetros de simulación. Una vez explicados los resultados que para cada caso proporciona el algoritmo, en la tabla 4.7 se compara el coste obtenido por las estrategias puras y las mixtas.

Para ello se ha definido un ratio, donde se divide el coste obtenido por las técnicas puras, directa y Hub&Spoke, representadas por las letras D y HS en la tabla, entre el obtenido por las técnicas mixtas, Hub&Spoke modificada y heurística, representadas por las letras M y H en la tabla. Si el ratio es menor que 1 significa que las técnicas puras obtienen mejor resultado que las mixtas. Este caso se ha representado en la tabla con color rojo oscuro para valores menores de 0,8 y rojo claro para valores entre 0,8 y 1.

Por el contrario, si el ratio es mayor que 1, significa que las técnicas mixtas obtienen mejores resultados que las puras. En la tabla se representa con color verde claro si el ratio está entre 1 y 1,2; verde oscuro si está entre 1,2 y 2; y azul para valores mayores que 2. En este caso el coste obtenido por las técnicas mixtas es menor que la mitad del coste obtenido por las técnicas puras.

Nº órdenes	Ventanas	Espera	3 Provincias					21 Provincias				
			D-M	D-H	HS-M	HS-H	M-H	D-M	D-H	HS-M	HS-H	M-H
5 órdenes	Grande	SÍ	1,29	1,29	1,04	1,04	1,00	0,98	1,01	1,08	1,12	1,03
	Grande	NO	1,46	1,47	1,03	1,04	1,00	1,07	1,12	1,08	1,12	1,04
	Pequeña	SÍ	0,95	0,95	1,29	1,30	1,00	1,00	1,00	1,34	1,34	1,00
	Pequeña	NO	0,95	0,95	1,44	1,44	1,00	1,00	1,00	1,34	1,34	1,00
	Mixta	SÍ	0,85	0,85	1,17	1,17	1,00	0,99	0,92	1,24	1,15	0,92
	Mixta	NO	1,04	1,04	1,14	1,14	1,00	1,06	1,06	1,24	1,24	1,00
25 órdenes	Grande	SÍ	0,93	0,93	1,00	0,99	0,99	0,95	0,98	1,03	1,08	1,04
	Grande	NO	1,76	1,77	1,01	1,01	1,01	1,16	1,21	1,02	1,06	1,04
	Pequeña	SÍ	0,91	0,92	1,28	1,29	1,01	1,01	1,01	1,24	1,24	1,00
	Pequeña	NO	1,02	1,00	1,77	1,73	0,98	1,00	1,00	1,28	1,28	1,00
	Mixta	SÍ	0,88	0,87	1,16	1,15	0,99	0,98	1,02	1,18	1,22	1,04
	Mixta	NO	1,25	1,27	1,43	1,45	1,01	1,02	1,03	1,24	1,25	1,01
50 órdenes	Grande	SÍ	0,87	0,84	0,97	0,94	0,97	0,95	0,97	0,97	0,99	1,02
	Grande	NO	1,78	1,80	0,97	0,99	1,01	1,39	1,39	1,00	1,00	1,00
	Pequeña	SÍ	0,93	0,91	1,35	1,32	0,98	1,00	1,02	1,26	1,28	1,02
	Pequeña	NO	1,04	1,03	1,91	1,89	0,99	1,01	1,01	1,36	1,35	0,99
	Mixta	SÍ	0,81	0,79	1,20	1,16	0,97	0,96	1,02	1,17	1,24	1,06
	Mixta	NO	1,26	1,27	1,32	1,33	1,01	1,03	1,05	1,22	1,25	1,02
100 órdenes	Grande	SÍ	0,96	0,97	0,99	1,00	1,01	0,97	0,97	0,98	0,99	1,01
	Grande	NO	2,00	1,96	0,98	0,96	0,98	1,41	1,38	1,06	1,04	0,98
	Pequeña	SÍ	0,87	0,89	1,34	1,36	1,02	1,02	1,04	1,17	1,19	1,02
	Pequeña	NO	0,92	0,91	2,03	2,01	0,99	1,01	1,02	1,31	1,32	1,01
	Mixta	SÍ	0,81	0,81	1,22	1,22	1,00	0,90	0,91	1,14	1,16	1,01
	Mixta	NO	1,22	1,31	1,54	1,65	1,07	1,12	1,11	1,27	1,26	0,99
250 órdenes	Grande	SÍ	0,89	0,90	0,99	1,00	1,01	1,03	1,05	1,09	1,11	1,01
	Grande	NO	1,90	1,89	0,93	0,92	0,99	1,53	1,53	1,15	1,15	1,00
	Pequeña	SÍ	0,89	0,88	1,32	1,32	1,00	1,01	1,02	1,28	1,30	1,02
	Pequeña	NO	0,94	0,95	2,13	2,18	1,02	1,01	1,02	1,45	1,46	1,01
	Mixta	SÍ	0,75	0,77	1,14	1,18	1,03	0,82	0,88	1,19	1,28	1,08
	Mixta	NO	1,37	1,49	1,45	1,59	1,09	1,09	1,09	1,31	1,31	1,00

Tabla 4.7. Ratios de comparación

Observando la tabla 4.7, se puede concluir que la estrategia directa pura resulta más económica que las estrategias mixtas en los casos en los que la distribución de nodos se encuentre muy concentrada y que se cumpla que la diferencia entre las ventanas temporales sea ajustada o que siendo amplia o mixta, se permita espera. Si los nodos se encuentran más distribuidos, como es el caso de las 21 provincias, la estrategia directa resulta más económica sólo en algunos casos en los que la diferencia entre ventanas sea amplia o mixta y se permita espera. Como se ha comentado antes, son unos casos difíciles de encontrar en la práctica.

Si se compara la estrategia de Hub&Spoke pura con las estrategias mixtas, se observa que la primera es menos costosa en los casos en los que los nodos se encuentran concentrados y que la diferencia entre las ventanas de recogida y de entrega es amplia, ya que estas condiciones le benefician. Conforme aumenta la dispersión de los nodos, la diferencia con las estrategias mixtas se reduce en los casos comentados.

Las estrategias puras son mejores en los casos puntuales en los que las restricciones temporales son idóneas para permitir la agrupación de rutas. Por el contrario, cuando se tiene que realizar en la práctica un elevado número de envíos desde distintos orígenes a distintos destinos, lo más común es que cada envío posea unas características temporales distintas. Además, la espera puede acarrear un coste adicional, así que es deseable eliminarla. En este contexto, de diferencia entre ventanas mixta y donde la espera no está permitida, se comprueba que las técnicas mixtas obtienen mejores resultados que las técnicas puras.

A continuación, en la figura 4.2, aparece la distribución de los ratios obtenidos.

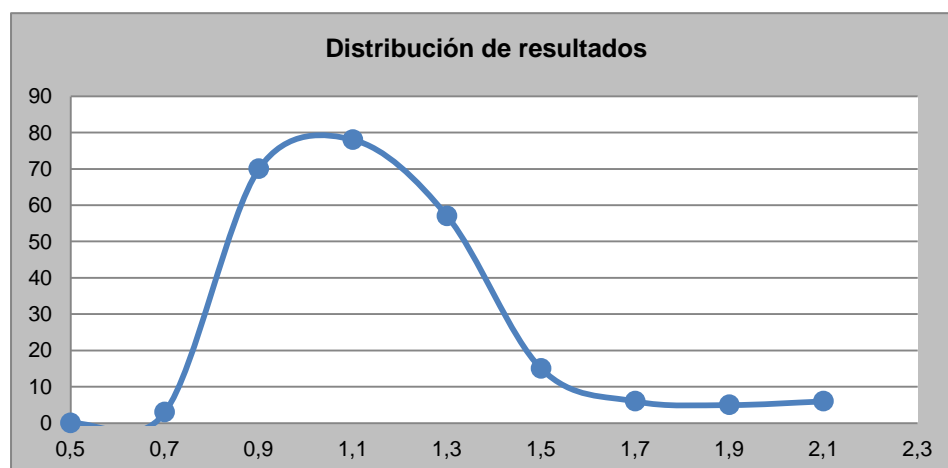


Figura 4.2. Distribución de ratios

En esta figura se observa que la mayor cantidad de resultados se agrupan en torno a 1, es decir, que no hay gran diferencia entre el uso de una estrategia u otra en la mayoría de los casos. Sin embargo, fuera de la zona de mayor concentración, se observa que la caída en

la gráfica en la zona izquierda es más pronunciada que en la derecha. Esto se debe a que los casos donde las estrategias mixtas son notablemente mejores que las puras son más numerosos que los casos donde ocurre lo contrario, que las estrategias puras son notablemente mejores que las mixtas.

Este resultado es el esperado, puesto que como indica el título del PFC, se busca una optimización con el algoritmo propuesto.

4.8 Análisis adicionales

Además de los análisis que se han presentado anteriormente, se han realizado un estudio adicional para entender mejor la metodología de la solución propuesta y validar los resultados. Este estudio aparece en el anexo VII, y presenta un análisis detallado de la solución en los casos de 5 órdenes de envío. Para tamaños del problema mayores, este análisis sería inviable por su extensión, ya que el número de soluciones a examinar crece exponencialmente con el problema.

Por otra parte, en el anexo VIII, se ha hecho un estudio de la variación del porcentaje de agrupación en función del tamaño del problema. Este estudio ayuda a explicar los resultados obtenidos, puesto que el coste se ha relacionado con la distancia recorrida por todas las rutas, y esta distancia en general disminuye conforme aumenta el porcentaje de agrupación.

5. CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio realizado para alcanzar los objetivos marcados en el apartado 1.1 de la memoria.

Tras las conclusiones se enumeran una serie de líneas de trabajo a seguir para continuar con el estudio de este PFC.

5.1 Resumen de resultados y conclusiones

En los objetivos del proyecto se planteaba validar si por técnicas heurísticas y metaheurísticas se podía resolver el problema de reparto de mercancía. Tras realizar el análisis previo de los resultados esperados mostrado en el apartado 4.4, se ha comprobado que el algoritmo propuesto, devuelve resultados coherentes con lo esperado. Esto no ha sido así desde el primer momento, ya que tras realizar el análisis de las primeras soluciones propuestas, se tuvo que revisar y modificar el algoritmo para conseguir una solución válida.

Por otra parte, el objetivo principal del proyecto era comprobar si las estrategias de envío mixtas resultaban más económicas que las puras y bajo qué condiciones. Tras los análisis realizados se puede concluir lo siguiente:

- No se puede afirmar que en todos los casos analizados, las estrategias mixtas son más beneficiosas, ya que hay algunas combinaciones de parámetros que benefician a las técnicas puras.
- La estrategia directa pura resulta más económica en los casos en los que la diferencia entre la ventana temporal de recogida y la de entrega sea reducida, es decir, en los casos donde el tiempo disponible para realizar el servicio es muy ajustado y esto se traduce en que las rutas no tienen tiempo suficiente de agrupar varias órdenes. Este tipo de estrategia devuelve buenos resultados en el caso de que la diferencia entre ventanas sea amplia o mixta y se permita espera, pero como se ha comentado este caso no es frecuente ni eficiente en la realidad.
- La estrategia de Hub&Spoke obtiene buenos resultados únicamente en el caso de que la diferencia entre la ventana de recogida y de entrega sea amplia, ya que en este

caso habrá tiempo suficiente para pasar por uno o dos *hubs* y a su vez, agrupar más de una orden en una misma ruta.

- Las técnicas mixtas, aproximan su resultado a la técnica pura que más convenga según la combinación de los parámetros y obtienen así buenos resultados. Esto es, en el caso de diferencia entre ventanas amplia se aproxima a una estrategia Hub&Spoke y si la diferencia es estrecha se aproxima a una estrategia directa.
- En el caso de que se deban realizar numerosos envíos y que cada uno tenga unas condiciones temporales distintas, que es el caso más próximo a la realidad, se ha comprobado que las técnicas mixtas obtienen mejores resultados que cualquiera de las dos técnicas puras.
- En cualquier caso, para implementar en la práctica las diferentes estrategias se tomarían únicamente los casos donde la diferencia entre una estrategia y otra es significativa, comentados en los puntos precedentes.

5.2 Líneas futuras

A continuación se presentan unas propuestas para continuar con la investigación que se ha nombrado en la introducción a partir de este proyecto.

- En este proyecto se ha tomado como dato de entrada el número y localización de los *hubs*. Se propone el estudio del número idóneo de *hubs* para cubrir la demanda total de la península así como su ubicación dentro de la misma.
- Debido a la orografía del terreno, a las infraestructuras y a la congestión del tráfico, en determinadas zonas geográficas la circulación es menos fluida que en otras. Se propone la separación del territorio en varias zonas incluyendo en cada una de ellas las restricciones precisas en la velocidad de circulación o en las ventanas temporales para adecuar de mayor forma el estudio a la realidad.
- Uno de los mayores problemas en la planificación logística es el llenado total de los camiones. En la realidad se constata que en determinados trayectos es difícil que los camiones hagan los recorridos de ida y vuelta a carga completa. Esto ocurre en el transporte de mercancías al sur de España, ya que es difícil conseguir la vuelta de los camiones cargados en su totalidad. Se propone el estudio detallado del flujo de mercancías y del llenado de vehículos.

6. BIBLIOGRAFÍA

Las referencias bibliográficas que se han utilizado para la realización de este PFC son las siguientes:

- [1] M. Minsky, "Computación: Máquinas Finitas e Infinitas", Prentice-Hall, 1967.
- [2] Cook, "The complexity of Theorem Proving Procedures", 1971.
- [3] K. Rinnooy, "Computer-Aided Complexity Classification of Deterministic Scheduling Problems", 1981.
- [4] M. Estrada, "Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería", Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.
- [5] C. Reeves, "Modern Heuristic for Combinatorial Problems, Blackwell Scientific Publishing", 1993.
- [6] F. Glover, "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", 1986.
- [7] M. Dorigo, "Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis", Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1992.
- [8] Barcos y Á. Rodríguez, "Modelización de un sistema de transporte de muchos orígenes a muchos destinos con un solo hub", Departamento de Organización Industrial E.S. Ingenieros de San Sebastián, U. Navarra, 2010.
- [9] B. Crevier, J. Cordeau y G. Laporte, "The multi-depot vehicle routing problem" European Journal of Operational Research, nº 176, pp. 756-773, 2005.

7. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

7.1 Índice de tablas

Tabla 3.1. Parámetros de simulación	17
Tabla 4.1. Combinaciones de simulación	18
Tabla 4.2. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío directa pura	20
Tabla 4.3. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío HUB&SPOKE	20
Tabla 4.4. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío HUB&SPOKE Modificada	21
Tabla 4.5. Comportamiento esperado de agrupación de rutas con estrategia de envío heurística	21
Tabla 4.6. Resultados de simulación	23
Tabla 4.7. Ratios de comparación	28

7.2 Índice de tablas

Figura 2.1. Esquema de red de distribución	8
Figura 2.1. Esquema de red de distribución	8
Figura 2.3. Colonia de hormigas	11
Figura 3.1. Elipse de agrupación de nodos	15
Figura 3.2. Elipses de agrupación envíos a través de HUB.	15
Figura 3.3. Elipse de agrupación de envíos directos	16

ANEXOS

ANEXO I

VRP (Vehicle Routing Problem)

1.1 Introducción

El problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem o VRP), es un problema de optimización combinatoria de gran importancia en diferentes entornos logísticos. *“El problema de distribuir productos desde ciertos almacenes a sus usuarios finales juega un papel fundamental en la gestión de algunos sistemas logísticos, y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros. Esos potenciales ahorros justifican en gran medida la utilización de técnicas de investigación operativa como facilitadoras de la planificación, dado que se estima que los costos del transporte representan entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes.”* [1]

El VRP data del año de 1959 y fue introducido por Dantzig y Ramser en [2], quienes describieron una aplicación real de la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron una formulación matemática. Cinco años después, Clarke y Wright en [3] propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para resolverlo. Y es así como se dio comienzo a grandes investigaciones y trabajos en el área de ruteo de vehículos.

Este problema puede entenderse como la intersección de dos conocidos problemas de optimización combinatoria. El primero, el del agente viajero (TSP, Traveling Salesman Problem) considerando la capacidad de cada automóvil como infinita [4] y el de empaquetamiento en compartimentos (BPP, Bin Packing Problem) [5].

Formalmente puede describirse como sigue: dada una flota de vehículos con capacidad uniforme, un origen común, y varias demandas de cliente distintas y distribuidas aleatoriamente en un espacio geográfico, encontrar el grupo de rutas que satisface todas las demandas y que minimizan la función de coste de distribución (en función de la distancia recorrida, el nivel de servicio realizado teniendo en cuenta los tiempos de entrega, el número de vehículos usados, etc.). Todos los itinerarios deben comenzar y terminar en el origen y se deben diseñar de forma que cada cliente sea servido una única vez y por un solo vehículo. (GITEL, Unizar)

Las variables o parámetros involucrados en el problema son: visitas, depósitos, localizaciones geográficas, vehículos, capacidades y pesos. Las visitas son entregas o

recolección de paquetes. El depósito es donde comienzan todas las rutas y donde terminan. Las localizaciones geográficas involucran: tiempo, distancia, origen y destino. Los vehículos son los que realizan los viajes (flota homogénea todos los vehículos son iguales o heterogénea todos los vehículos son diferentes). Las capacidades son las que se observan en el vehículo como son: carga total, volumen total, número de las plataformas. Los pesos especifican el costo de recorrido entre las localizaciones geográficas.

1.2 Variantes del VRP

Con el fin de acercarse a los contextos reales de los problemas planteados, se han propuesto diferentes versiones del problema VRP, dependiendo de los parámetros del problema, como son: VRP con múltiples depósitos (MDVRP), VRP periódico (PVRP), VRP de entrega dividida (SDVRP), VRP estocástico (SVRP), VRP con recogidas y entregas (VRPPD), VRP con backhauls (VRPB), VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) (Aronson, 1996 y Corona, 2005).

- VRP con múltiples depósitos (MDVRP). Una empresa puede disponer de varios depósitos o almacenes desde los que suministra la demanda de sus clientes. Si los clientes están agrupados alrededor de los depósitos, entonces el problema puede verse como un conjunto de problemas independientes VRP. Pero si los clientes y los depósitos están mezclados, entonces se ha de resolver un problema MDVRP. Para resolver un problema MDVRP se necesita asignar los clientes a los depósitos. Para cada depósito se tiene una flota de vehículos. Cada vehículo que parte de un depósito, sirve a los clientes asignados a ese depósito y después regresa a dicho depósito. El objetivo del problema es servir a todos los clientes minimizando el número de vehículos y la distancia total viajada.
- VRP periódico (PVRP). En el problema VRP clásico, el periodo de planificación es un día. En el caso del problema PVRP, el periodo de planificación se extiende a M días. El objetivo es minimizar la flota de vehículos y el tiempo total de viaje. Un vehículo puede no regresar al depósito el mismo día de su partida. Durante el periodo de M días, cada cliente debe ser visitado al menos una vez.
- VRP de entrega dividida (SDVRP). Se trata de un problema VRP en el que se permite que un cliente pueda ser atendido por varios vehículos si el coste total se reduce. Esto es importante si el tamaño de los pedidos de un cliente excede la capacidad de un vehículo. El objetivo es minimizar la flota de vehículos y el tiempo total de viaje.

- VRP estocástico (SVRP). Se trata de un VRP en que uno o varios componentes son aleatorios. Por ejemplo: Clientes aleatorios. Un cliente aleatorio i , es un cliente que tiene una probabilidad p_i de estar presente y una probabilidad $1-p_i$ de estar ausente. Demandas estocásticas: la demanda del cliente i , d_i , tiene una determinada distribución de probabilidad. Tiempos estocásticos: el tiempo de servicio, t_i , y los tiempos de viaje t_{ij} , son variables aleatorias. Cuando algunos datos son aleatorios no es posible cumplir con todas las restricciones. Por tanto se puede llevar a cabo ciertas acciones correctivas cuando una restricción es violada.
- VRP con recogidas y entregas (VRPPD). Es un VRP en que cabe la posibilidad de que los clientes pueden devolver determinados bienes. Por tanto, se debe tener presente que los bienes devueltos por los clientes caben en el vehículo. Esta restricción hace más difícil el problema de planificación y puede obligar a una mala utilización de las capacidades de los vehículos, un aumento de las distancias recorridas o a un mayor número de vehículos. Por todo lo dicho, se suelen considerar situaciones tales como que las entregas comienzan en un depósito y las recogidas se traen a la vuelta al depósito, de manera que no hay intercambio de bienes entre clientes. Otra alternativa es relajar la restricción de que todos los clientes deben ser visitados exactamente una vez. El objetivo es minimizar la flota de vehículos y el tiempo total de recorrido con la restricción de que el vehículo debe tener suficiente capacidad para transportar los bienes a entregar así como los recogidos para devolverlos al depósito.
- VRP con backhauls (VRPB). El VRPB es un VRP en que los clientes pueden demandar o devolver artículos. Por tanto se necesita tener en cuenta que los bienes que los clientes devuelven caben en el vehículo. Pero además, se debe cumplir que todas las entregas se realizan antes de las recogidas. Esto se debe al hecho de que los vehículos se cargan por la parte trasera y que la recolocación de la carga en los vehículos se considera antieconómica o no factible. Las cantidades demandadas y las recogidas se conocen de antemano. El VRPB es similar al VRPPD con la restricción de que en el caso del VRPB todas las entregas de una ruta se deben completan antes de las recogidas. El objetivo es encontrar un conjunto de rutas que minimiza la distancia total recorrida.
- VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) Es un VRP con la restricción adicional de que se asocia una ventana de tiempo con cada cliente. Al cliente i , se le asocia la ventana de tiempo (Corona, 2005). Si un vehículo llega al cliente antes de la ventana, el vehículo tiene que esperar hasta ese instante para atender al cliente. Si llega en el intervalo de la ventana de tiempo, el vehículo suministra la demanda en el momento de la llegada y finalmente si el vehículo llega con posterioridad, entonces el cliente

queda sin atender. El objetivo es minimizar la flota de vehículos, el tiempo total de viaje así como el tiempo total de espera al suministro de los clientes.

1.3 Técnicas de solución del VRP

La solución para el problema VRP se puede obtener, dependiendo de las instancias, mediante técnicas exactas, heurísticas y metaheurísticas. Una instancia del problema es el valor que se le da a cada parámetro del problema. Unos ejemplos de instancias para el problema VRP podrían ser: 5 visitas por ruta, 2 depósitos, localizaciones geográficas ubicadas a 30 minutos una de otra, 10 vehículos que conforman flota heterogénea, capacidades de 20 paquetes por vehículo.

Dentro de las aproximaciones exactas se encuentran la ramificación y acotamiento (hasta 100 nodos), ramificación y corte, programación dinámica y programación lineal entera. Dentro de las técnicas heurísticas se encuadran los métodos de construcción, el algoritmo de 2 fases, (que dividen a VRP en dos etapas: la de asignación de clientes a vehículos y la de determinación del orden de visita a dichos clientes) y el algoritmo de mejora iterativa (toma como entrada una solución de otra heurística). Dentro de los metaheurísticos aparecen los algoritmos de colonia de hormigas, programación restringida, recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú y redes neuronales. Dependiendo de las condiciones del problema se escoge el método a utilizar. Para instancias pequeñas podemos formularlo como modelo de PLE (programación lineal entera), para instancias mayores es necesario modelarlo de manera general como un grafo.

1.4 Modelo general del VRP

El modelo general de VRP, se realiza a través de un grafo denotado como $G(V,E)$. $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ es el conjunto de vértices del grafo, donde v_0 corresponde al almacén y V' es el conjunto de los n clientes, es decir $V'=V/\{v_0\}$.

A es el conjunto de arcos del grafo representado como:

$$A = \{(v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V \wedge i \neq j\} \quad (1.1)$$

C es la matriz de distancias o costos c_{ij} entre los clientes v_i y v_j , d es un vector de demandas de los clientes, R_i es la ruta para el vehículo i , m es el número de vehículos (una ruta es asignada a cada vehículo), f_i es el costo fijo de utilización del vehículo i . Cuando:

$$C_{ij} = C_{ji} \forall (v_i, v_j) \in A \quad (1.2)$$

se dice que el problema es simétrico y entonces se reemplaza el conjunto A por el conjunto E , definido como:

$$E = \{v_i, v_j) | v_i, v_j \in V \cap i < j\} \quad (1.3)$$

Además del tiempo de recorrido, debe considerarse un tiempo de servicio, δ_i , requerido por un vehículo para descargar las mercancías d_i en v_i . Es necesario que la duración total de la ruta no sobrepase un límite dado D . Una solución factible S para problemas de este tipo puede ser compuesta de dos elementos: una partición R_1, \dots, R_m de V y una permutación σ_i de $R_i \cup v_0$ especificando el orden de los clientes en la ruta i . Por ejemplo una solución factible para un problema de 15 clientes podría ser una partición de tres rutas.

$$R_1 = \{v_2, v_7, v_{12}, v_{15}\} \quad (1.4)$$

$$R_2 = \{v_1, v_3, v_9, v_{10}, v_{14}\} \quad (1.5)$$

$$R_3 = \{v_4, v_5, v_6, v_8, v_{11}, v_{13}\} \quad (1.6)$$

Con permutaciones de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \{v_0, v_{12}, v_2, v_7, v_{15}, v_0\} \quad (1.7)$$

$$\sigma_2 = \{v_0, v_{10}, v_9, v_{14}, v_3, v_1, v_0\} \quad (1.8)$$

$$\sigma_3 = \{v_0, v_8, v_{11}, v_6, v_{13}, v_5, v_4, v_0\} \quad (1.9)$$

El costo de una ruta dada

$$R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_{n_i+1}\} \quad (1.10)$$

donde

$$v_0 = v_{n_i+1} \quad (1.11)$$

está definido por la función

$$C(R_i) = \sum_{j=0}^{n_i} C_{j,j+1} + \sum_{j=1}^{n_i} C(\delta_i) + f_i \quad (1.12)$$

Una ruta R_i es factible si el vehículo se detiene exactamente una vez en cada uno de los clientes que le corresponden y el tiempo total de la ruta $t(R_i)$ no excede un límite preestablecido $D: t(R_i) \leq D$.

Finalmente el costo de la solución S al problema corresponde a la función de costo total.

$$FCT_{VRP}(s) = \sum_{i=1}^m C(R_i) \quad (1.13)$$

ANEXO II

Clasificación de las técnicas metaheurísticas

Hay diferentes formas de clasificar las técnicas metaheurísticas [6]: basadas en la naturaleza (algoritmos bioinspirados) o no basadas en la naturaleza, basadas en memoria o sin memoria, con función objetivo estática o dinámica, etc.

La clasificación más empleada es la que se basa en si la técnica utiliza un único punto del espacio de búsqueda o trabaja sobre un conjunto o población. Según esta clasificación las metaheurísticas se dividen en las basadas en trayectoria y las basadas en población.

2.1 Metaheurísticas basadas en trayectoria

Estas técnicas parten de un punto inicial y van actualizando la solución presente mediante la exploración del vecindario, formando una trayectoria. La búsqueda finaliza cuando se alcanza un número máximo de iteraciones, se encuentra una solución con una calidad aceptable, o se detecta un estancamiento del proceso.

A continuación se describen algunas de las técnicas metaheurísticas basadas en trayectoria:

El Enfriamiento Simulado (ES), es una de las metaheurísticas más antigua [7]. ES simula el proceso de recocido de los metales y del cristal. En cada iteración se elige una solución S_1 , a partir de la solución actual S_0 . Si S_1 es mejor que S_0 , S_1 sustituye a S_0 como solución actual. Si S_1 es peor que S_0 , se sigue aceptando pero asignándole una determinada probabilidad. El algoritmo permite elegir soluciones peores a la actual para evitar caer en un óptimo local.

La Búsqueda Tabú (BT), es una de las metaheurísticas más utilizadas en problemas de optimización [8]. La BT se basa fundamentalmente en la utilización de un historial de búsqueda, que permite ejecutar su estrategia de análisis y exploración de diferentes regiones del espacio de búsqueda. Este historial o memoria se implementa como una lista tabú. En cada iteración se elige la mejor solución entre las permitidas y se añade a la lista tabú, donde se mantienen las soluciones recientes que se excluyen de las siguientes iteraciones.

La Búsqueda en Vecindario Variable (BVV) [9]. Este algoritmo es muy genérico, con muchos grados de libertad y permite variaciones y modificaciones particulares. Utiliza una estrategia de cambio entre diferentes estructuras del vecindario. Estas estructuras se definen en el comienzo del proceso algorítmico.

La Búsqueda Local Iterada (BLI) [10] se basa en que en cada iteración, a la solución actual se le aplica un cambio o modificación que da lugar a una solución intermedia. A esta nueva solución se le aplica una heurística base para mejorarla que suele ser un método de búsqueda local. Este nuevo óptimo local obtenido por el método de mejora puede ser aceptado como nueva solución actual si pasa un test de aceptación.

2.2. Metaheurísticas basadas en población

Las técnicas metaheurísticas basadas en población trabajan con un conjunto de individuos que representan otras tantas soluciones. Su eficiencia y resultado depende fundamentalmente de la forma con la que se manipula la población en cada iteración.

Seguidamente se describen algunas de las técnicas metaheurísticas basadas en población:

Los Algoritmos Evolutivos (AE) [11]. Este grupo de técnicas se inspiran en la capacidad de la evolución de seres o individuos para adaptarlos a los cambios de su entorno. Cada individuo representa una posible solución. El funcionamiento básico de estos algoritmos es el siguiente: La población se genera de forma aleatoria. Cada individuo de la población tiene asignado un valor de su bondad con respecto al problema considerado, por medio de una función de aptitud, capacidad, adaptabilidad o estado, también denominada con bastante frecuencia por la palabra inglesa “fitness”. El valor de la aptitud de un individuo es la información que el algoritmo utilizar para realizar la búsqueda. La modificación de la población se efectúa mediante la aplicación de tres operadores: selección, recombinación y mutación. En estos algoritmos se pueden distinguir la fase de selección, explotación de buenas soluciones, y la fase de reproducción, búsqueda de nuevas regiones. Se debe de mantener un equilibrio entre estas dos fases. La política de reemplazo permite la aceptación de nuevas soluciones que no necesariamente mejoran las existentes.

Los algoritmos evolutivos se pueden clasificar en las siguientes tres categorías:

Programación Evolutiva (PE), Estrategias Evolutivas (EE), y los Algoritmos Genéticos (AG), que constituyen una de las técnicas más conocidas.

La Búsqueda Dispersa (BD) [12] se basa en mantener un conjunto relativamente pequeño de soluciones, conjunto de referencia, que contiene buenas soluciones y otras soluciones diversas. A los diferentes subconjuntos de soluciones que se forman se les aplica operaciones de recombinación y mejora.

Los sistemas basados en Colonias de Hormigas, (ACO) [13], se inspiran en el comportamiento de las hormigas cuando buscan comida: inicialmente, las hormigas exploran el área cercana al hormiguero de forma aleatoria. Cuando una hormiga encuentra comida, la lleva al hormiguero. En el camino, la hormiga va depositando una sustancia química denominada feromona que guía al resto de hormigas a encontrar la comida. El rastro de feromona sirve a las hormigas para encontrar el camino más corto entre el hormiguero y la comida. Este rastro es simulado mediante un modelo probabilístico. Este es el algoritmo utilizado en la resolución del problema en este PFC, así que aparece explicado de forma más detallada en el Anexo III.

Los Algoritmos Basados en Nubes de Partículas o Particle Swarm Optimization (PSO) [14] son técnicas metaheurísticas inspiradas en el comportamiento del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. La toma de decisión por parte de cada individuo o partícula se realiza teniendo en cuenta una componente social y una componente individual, mediante las que se determina el movimiento de esta partícula para alcanzar una nueva posición.

ANEXO III

Colonias de hormigas

En este anexo se explican los fundamentos básicos de la técnica metaheurística usada en este PFC, denominada colonia de hormigas. En el comportamiento de las hormigas se distingue la búsqueda de alimentos, trazando el camino más corto entre el hormiguero y el emplazamiento de alimentos. El eje de esa búsqueda es el depósito de feromona como rastro que orienta el recorrido.

3.1 Optimización de colonias de hormigas

La base fundamental del algoritmo es la simulación de la reacción que exhibe una colonia de hormigas. La sustancia virtual es denominada rastro, como similar a la feromona.

La construcción de la solución necesita de un criterio para seleccionar la siguiente opción, esta decisión se basa en la intensidad de rastro presente en cada recorrido entre dos puntos adyacentes.

- El que tiene más valor de rastro o feromona, tiene la mayor probabilidad de ser elegido.
- Si no hay rastros, la probabilidad de elección es cero.
- Si todas las rutas tienen igual cantidad de rastros, la decisión es aleatoria.

Es decir la hormiga selecciona la ruta a través del mecanismo de decisión descrito, por tanto elegirá el siguiente punto del itinerario hasta haber visitado todos los nodos. Una vez se han considerado todos los puntos, la hormiga regresa al nodo inicial habiendo completado un viaje. Cuando se finaliza la expedición se evalúa la calidad de la solución, de forma que las hormigas o soluciones que mejor lo resuelven renuevan, por un proceso de actualización global, el rastro asignando un valor mayor. De esta forma, cuando todas las hormigas de un ciclo han finalizado el viaje, son analizados y actualizados los valores de las feromonas. Entonces, un nuevo ciclo comienza y se repite el proceso. Casi todas las hormigas seguirán el mismo viaje en cada ciclo y convergerá la solución. Se compara la mejor solución en el último ciclo para obtener la solución global.

3.2 Algoritmo de colonias de hormigas para el VRP

Las soluciones para el VRP con colonias de hormigas están basadas en la propuesta original para el Travelling Salesman Problem en [13], quien debe recorrer desde su casa todas las ciudades buscando el recorrido más corto.

La distancia entre las ciudades i y j , de coordenadas $(x_i; y_i)$ $(x_j; y_j)$, respectivamente, se calcula como:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.1)$$

Siendo n el número de ciudades, i alguna ciudad, $b_i(t)$ el número de hormigas en i en el tiempo t , el total de hormigas m resulta:

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t) \quad (3.2)$$

Cada hormiga tiene las siguientes características:

- Selecciona la siguiente ciudad a visitar. Esta selección está basada en una probabilidad que es función de la distancia a la ciudad (o parámetro heurístico) y la cantidad de rastro de feromona presente en cada tramo que conecta las ciudades.
- Tiene memoria sobre las ciudades que ha visitado (según una lista tabú) y las que no ha visitado.
- Cuando ha completado el viaje, deja una sustancia o rastro de feromona en cada tramo.

3.3 Rastro de la feromona

La intensidad del rastro en la ruta en cada tramo que conecta i con j en el tiempo t , se designa con $\zeta_{ij}(t)$.

En el tiempo 0 , $\zeta_{ij}(0)$ es tan pequeño como una constante pequeña positiva ζ_0 . En el tiempo t , cada hormiga elige una ruta y viaja a la siguiente ciudad en el tiempo $t+1$.

En cada iteración hay m movimientos provocados por las m hormigas (cada una haciendo un movimiento) en el intervalo $(t, t+1)$. Un ciclo es definido como n iteraciones, y significa que las m hormigas han completado un viaje. Al final de cada iteración, el algoritmo implementa una actualización local: reduce el nivel de rastro en los tramos seleccionados por la colonia en la iteración precedente. Cuando una hormiga viaja a la ciudad j desde la ciudad i , la regla de actualización ajusta la intensidad del rastro del tramo conectado por:

$$\zeta_{ij} = (1 - \psi)\zeta_{ij}(t) + \psi\zeta_0 \quad (3.3)$$

Donde Ψ es un parámetro ajustable entre 0 y 1 que representa la persistencia del rastro de la feromona. Además:

$$\zeta_0 = \frac{1}{nL_{nn}} \quad (3.4)$$

Donde nL_{nn} es la longitud calculada con el algoritmo heurístico donde se comienza aleatoriamente en una ciudad y se selecciona la siguiente basada en la distancia más corta hasta visitar todas las ciudades.

Al final de cada ciclo la intensidad del rastro es ajustada usando una actualización global. El primer paso es calcular la cantidad de rastro dejada en cada tramo, como:

$$\Delta\zeta_{ij}^k = \frac{1}{L_k} \quad (3.5)$$

Donde k representa alguna hormiga (de 1 a m). Y L_k es la longitud del ciclo elegida por una hormiga k .

El valor total de actualización del rastro para cada tramo es la suma de las cantidades dejadas por cada hormiga que haya seleccionado dicho tramo ij , y será:

$$\Delta\zeta_{ij}^k = \sum_{i=1}^m \Delta\zeta_{ij}^k \quad (3.6)$$

El valor de la actualización global está determinado por la siguiente expresión:

$$\zeta_{ij}(t+n) = (1 - \rho)\zeta_{ij}(t) + \rho\Delta\zeta_{ij} \quad (3.7)$$

Donde ρ es una constante entre 0 y 1, tal que $(1 - \rho)$ representa la evaporación del rastro entre t y $t+n$ (tiempo requerido para completar un ciclo).

3.4 Parámetro heurístico

El sistema admite que las hormigas posean un grado de visibilidad determinado por el parámetro heurístico u_{ij} , asociado a cada tramo, que depende de la distancia del mismo, teniendo preferencia los cercanos:

$$u_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3.8)$$

3.5 Probabilidad de preferencia

La combinación de la probabilidad heurística con el rastro de la feromona resultan en:

$$a_{ij}(t) = \frac{[\zeta_{ij}]^\alpha [\zeta_{ij}]^\alpha}{\sum_{l \in \text{permitidas}}^n [\zeta_{il}]^\alpha [u_{il}]^\beta} \quad (3.9)$$

Se trata de la proporción respecto a las ciudades vecinas permitidas desde la ciudad i . Los parámetros α y β son constantes usadas para controlar la importancia de los valores de los rastros de las feromonas locales y visibles.

La probabilidad $p_{ij}^k(t)$ de que la hormiga K elija ir de i a j en el tiempo t es:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in \text{permitidas}}^n a_{il}} \quad (3.10)$$

Si la hormiga no está permitida viajar a j entonces, $p_{ijk}(t) = 0$.

ANEXO IV

Flujo de mercancías y localización de nodos

Para realizar la simulación de una forma más real, se ha estudiado el flujo de mercancías en territorio nacional. Para ello, se ha consultado la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística. Los flujos obtenidos son una aproximación lo más cercana posible a la realidad con los datos disponibles.

Por una parte, se dispone del flujo total de mercancía, sin distinción según el tipo de producto, entre cada Comunidad Autónoma y por otra parte, se dispone del movimiento total de mercancía distribuida en toda España según su tipo. Para este proyecto se ha tenido en cuenta el tipo de mercancía alimentaria, debido a que este tipo de producto es distribuido, en su mayoría, en palés y es la unidad de medida utilizada para la capacidad del vehículo de distribución.

Relacionando el flujo total de mercancía transportada entre cada Comunidad Autónoma y la mercancía alimentaria total, se obtiene el flujo de producto alimentario entre cada comunidad. Para dividirlo entre cada provincia, se ha utilizado como indicador el número de empresas de comercio, transporte y hostelería existentes en cada provincia obtenido del Instituto Nacional de Estadística. Este dato puede ser un buen indicador para la distribución por provincias, pues este sector de empresas funciona en gran parte con producto paletizado.

Además del análisis del flujo de mercancías, se ha estudiado la localización de los nodos de origen y destino de la mercancía. Para ello, en función de la población de cada provincia, se han seleccionado para cada una de ellas en torno a 15, 25, 50 o 75 nodos localizados en zonas donde se prevé que exista movimiento de mercancía. Así se han obtenido más de 1.000 nodos repartidos por toda la península.

Los datos obtenidos referentes al flujo de mercancía y a la localización geográfica exacta de los nodos de origen y destino de mercancías se han utilizado para la generación aleatoria de órdenes de envío en la herramienta utilizada para la simulación.

ANEXO V

Resultados medios

En el anexo que se presenta a continuación aparecen los resultados obtenidos en las simulaciones. Las tablas siguientes reflejan una media de los 3 casos que se han simulado y que aparecen en el anexo VI.

Para cada tamaño del problema aparecen 4 figuras, dos de ellas relativas al caso en que los nodos están concentrados en 3 provincias y las otras dos relativas al caso en que los nodos se encuentran distribuidos en 21 provincias. Para cada caso, se muestra el coste total y el porcentaje de agrupación de rutas de cada combinación usando las 4 estrategias de envío. Además, para comprender mejor el comportamiento de las técnicas mixtas, se adjunta una tabla con el porcentaje de rutas directas en cada combinación.

5.1 5 Órdenes de envío

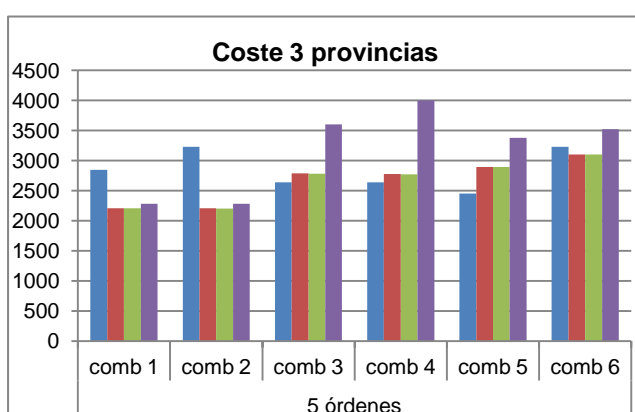


Tabla 5.1. Costes 5 órd, 3 prov.

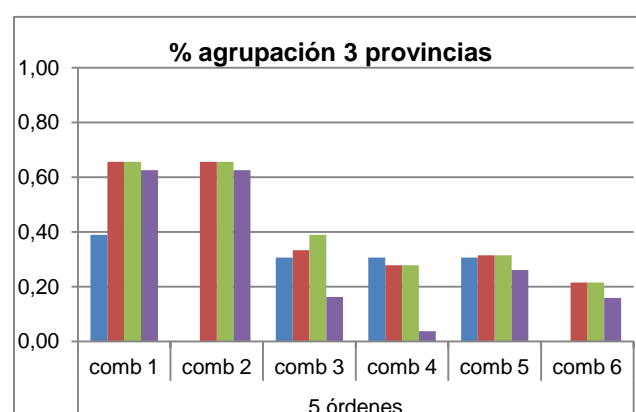


Tabla 5.2. % Agrupación 5 órd, 3 prov.

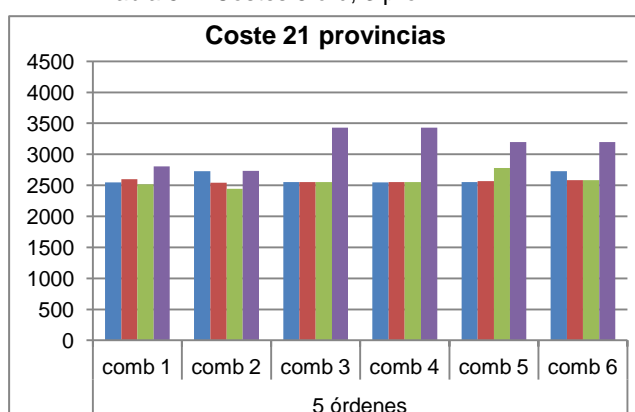


Tabla 5.3. Costes 5 órd, 21 prov.

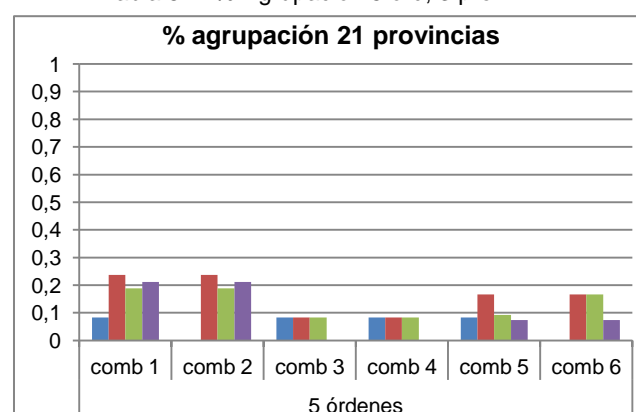
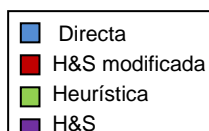


Tabla 5.4. % Agrupación 5 órd, 21 prov.



	Comb1		Comb2		Comb3		Comb4		Comb5		Comb6	
3 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,65	0,65	0,65	0,65	0,27	0,33	0,21	0,21	0,29	0,29	0,22	0,22
% directas	0,18	0,18	0,18	0,18	0,53	0,53	0,79	0,79	0,47	0,47	0,50	0,50
21 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,22	0,19	0,22	0,19	0,07	0,07	0,07	0,07	0,18	0,10	0,18	0,18
% directas	0,44	0,63	0,44	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	0,65	0,55	0,65	0,76

Tabla 5.5. % Rutas directas 5 órdenes

5.2 25 Órdenes de envío

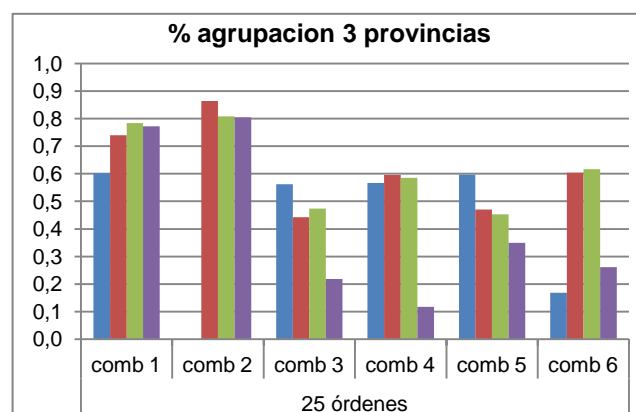
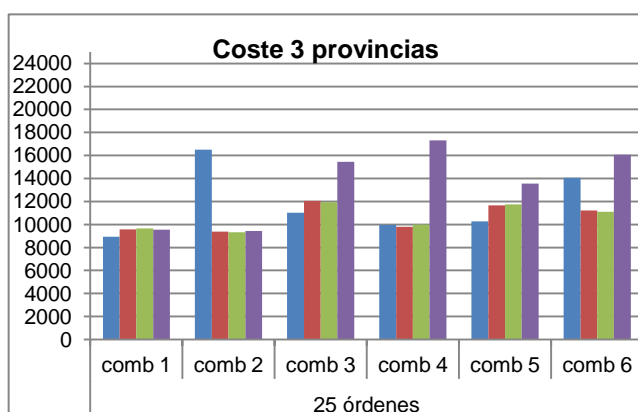


Tabla 5.6. Costes 25 órd. 3 prov.

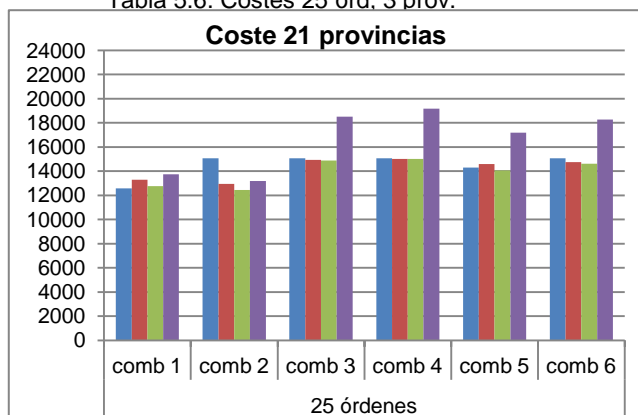


Tabla 5.7. % Agrupación 25 órd. 3 prov.

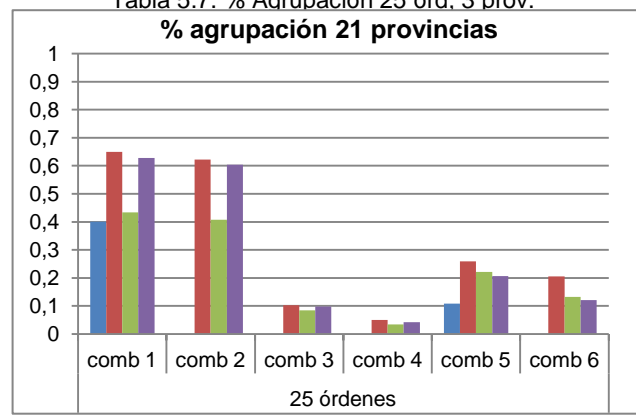


Tabla 5.8. Costes 25 órd, 21 prov.

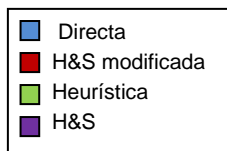


Tabla 5.9. % Agrupación 25 órd, 21 prov.

	Comb1		Comb2		Comb3		Comb4		Comb5		Comb6	
3 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,75	0,79	0,87	0,81	0,41	0,42	0,60	0,60	0,47	0,45	0,60	0,62
% directas	0,01	0,01	0,00	0,00	0,20	0,20	0,72	0,74	0,16	0,16	0,17	0,23
21 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,65	0,43	0,62	0,41	0,11	0,09	0,05	0,04	0,26	0,22	0,21	0,13
% directas	0,03	0,26	0,02	0,12	0,71	0,78	0,85	0,77	0,46	0,47	0,51	0,64

Tabla 5.10. % Rutas directas 25 órdenes

5.3 50 Órdenes de envío

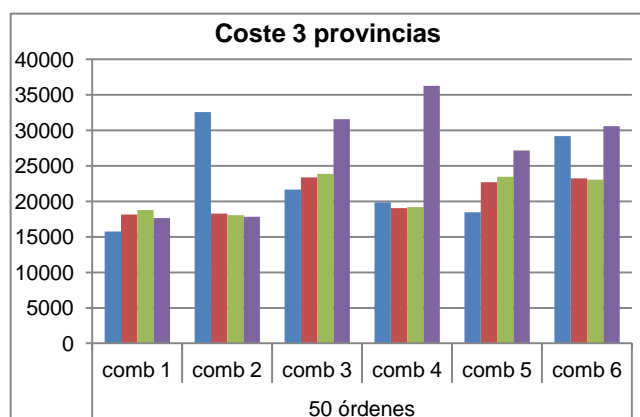


Tabla 5.11. Costes 50 órd, 3 prov.

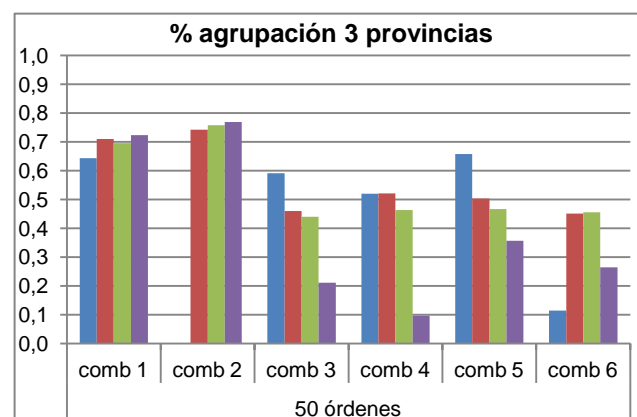


Tabla 5.12. % Agrupación 50 órd, 3 prov.

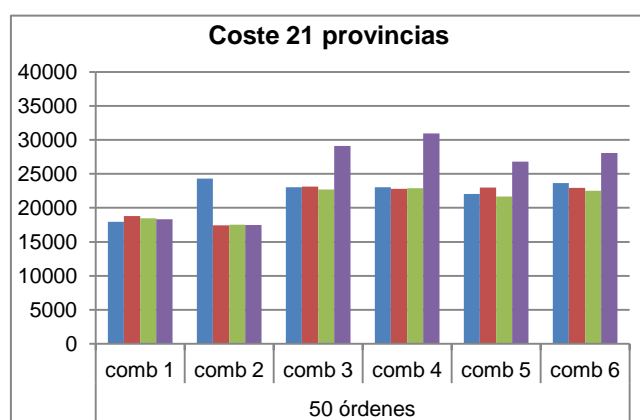


Tabla 5.13. Costes 50 órd, 21 prov.

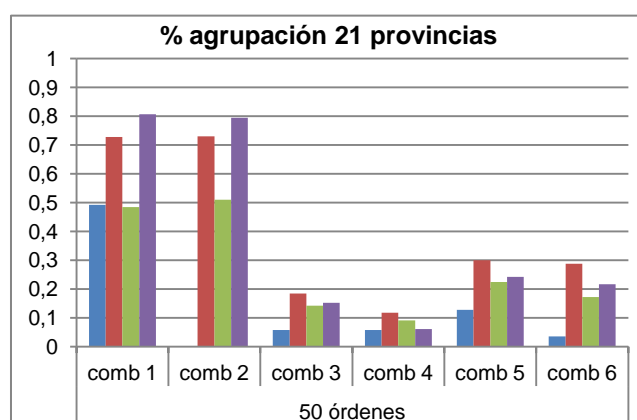
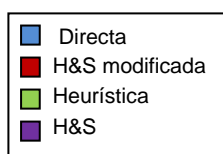


Tabla 5.14. % Agrupación 50 órd, 21 prov.



	Comb1		Comb2		Comb3		Comb4		Comb5		Comb6	
3 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,71	0,69	0,74	0,75	0,46	0,43	0,52	0,47	0,50	0,46	0,44	0,45
% directas	0,07	0,02	0,01	0,00	0,28	0,26	0,51	0,55	0,12	0,11	0,20	0,20
21 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,73	0,48	0,73	0,51	0,18	0,14	0,12	0,09	0,29	0,22	0,29	0,17
% directas	0,02	0,36	0,01	0,32	0,43	0,58	0,79	0,70	0,36	0,54	0,49	0,60

Tabla 5.15. % Rutas directas 50 órdenes

5.4 100 Órdenes de envío

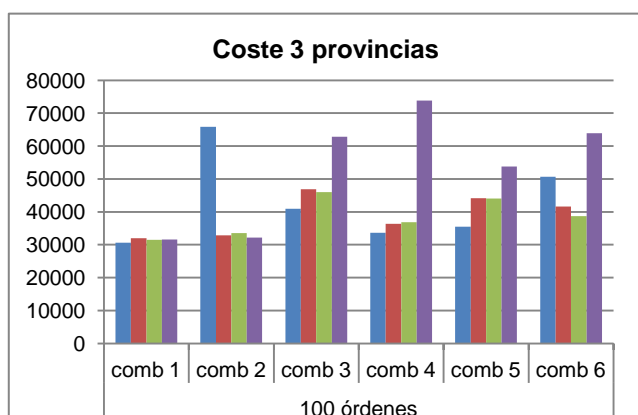


Tabla 5.16. Costes 100 órd, 3 prov.

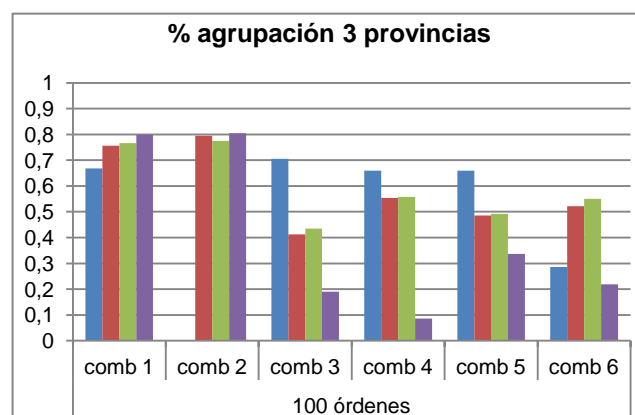


Tabla 5.17. % Agrupación 100 órd, 3 prov.

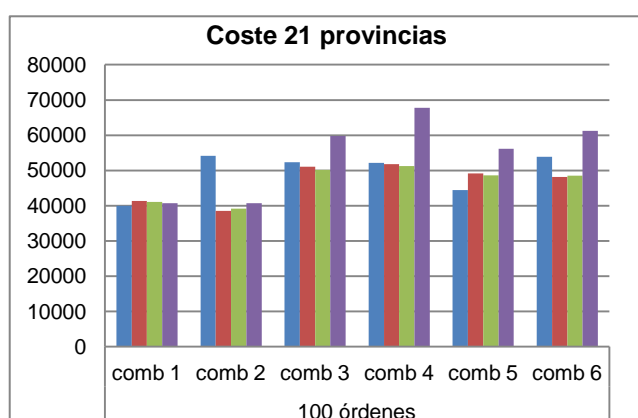


Tabla 5.18. Costes 100 órd, 21 prov.

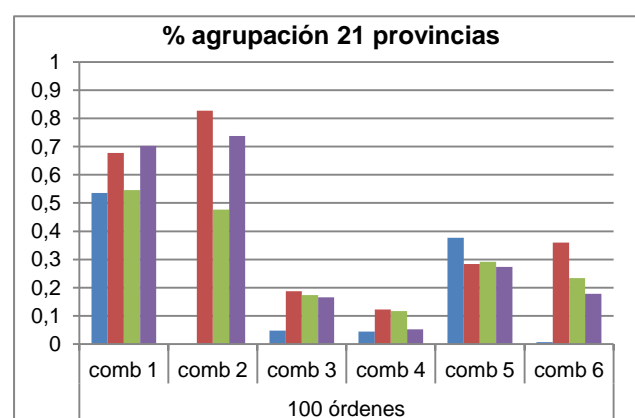
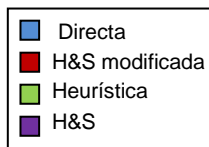


Tabla 5.19. % Agrupación 100 órd, 21 prov.



	Comb1		Comb2		Comb3		Comb4		Comb5		Comb6	
3 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,76	0,76	0,79	0,78	0,41	0,43	0,55	0,55	0,48	0,49	0,52	0,55
% directas	0,10	0,06	0,01	0,02	0,20	0,21	0,50	0,44	0,16	0,16	0,27	0,27
21 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,68	0,55	0,83	0,48	0,19	0,17	0,12	0,11	0,28	0,29	0,36	0,23
% directas	0,01	0,20	0,00	0,18	0,22	0,29	0,37	0,35	0,19	0,28	0,23	0,29

Tabla 5.20. % Rutas directas 50 órdenes

5.5 250 Órdenes de envío

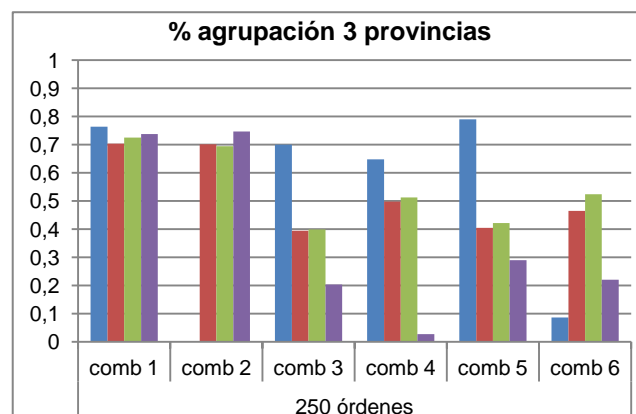
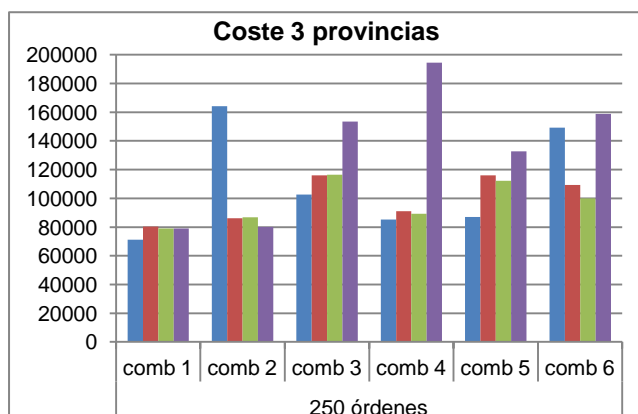


Tabla 5.21. Costes 250 órd, 3 prov.

Tabla 5.22. % Agrupación 250 órd, 3 prov.

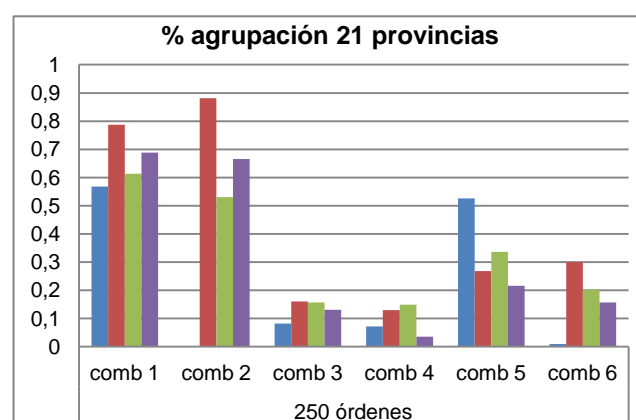
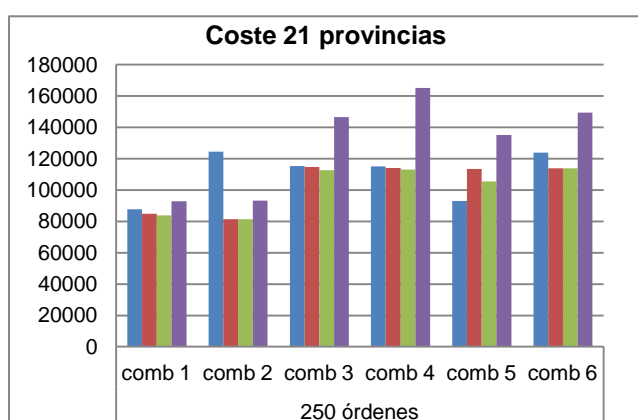
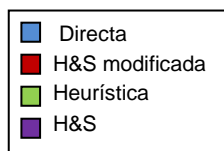


Tabla 5.23. Costes 250 órd, 21 prov.

Tabla 5.24. % Agrupación 250 órd, 21 prov.



	Comb1		Comb2		Comb3		Comb4		Comb5		Comb6	
3 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,71	0,73	0,70	0,69	0,39	0,40	0,50	0,51	0,40	0,42	0,45	0,52
% directas	0,07	0,07	0,01	0,02	0,19	0,19	0,57	0,56	0,12	0,13	0,28	0,28
21 provincias	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
% agrupación	0,79	0,61	0,88	0,53	0,16	0,16	0,13	0,15	0,27	0,34	0,30	0,20
% directas	0,09	0,35	0,02	0,39	0,47	0,51	0,74	0,63	0,30	0,39	0,42	0,50

Tabla 5.25. % Rutas directas 50 órdenes

ANEXO VI

Resultados completos

En las siguientes gráficas aparecen representados los resultados obtenidos en cada simulación. Las gráficas muestran los costes totales de transporte y el porcentaje de rutas agrupadas respecto al total de rutas. Se muestran los 3 casos de simulación según el tamaño del problema (5, 25, 50, 100 y 250 órdenes de envío) y la dispersión de nodos (en 3 y 21 provincias)

6.1 5 órdenes de envío. 3 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

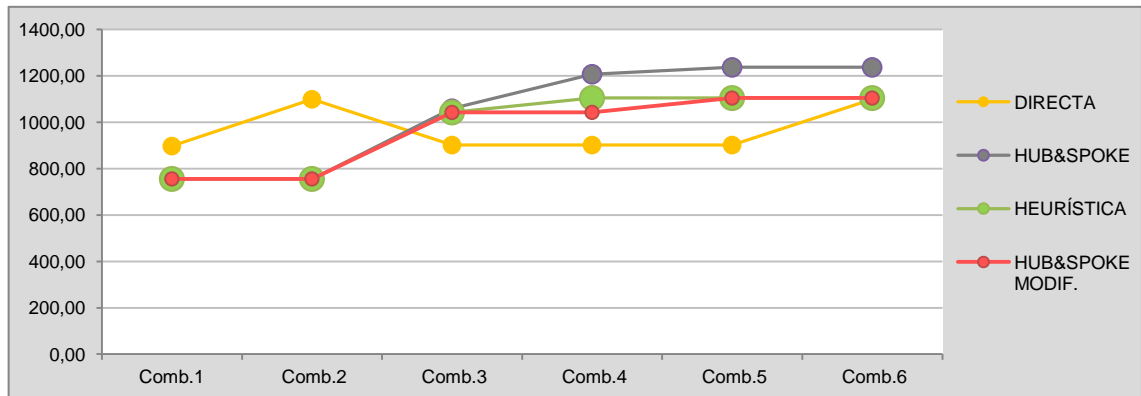


Tabla 6.1. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

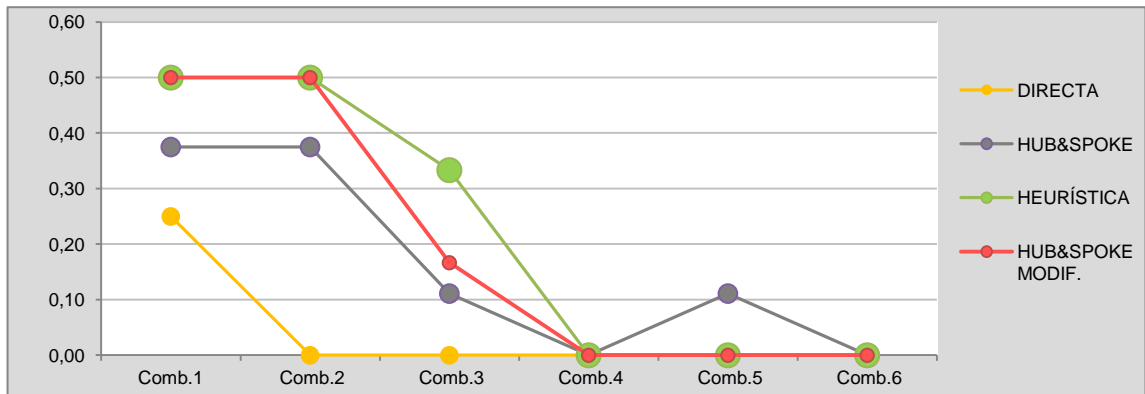


Tabla 6.2. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1

Caso 2

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

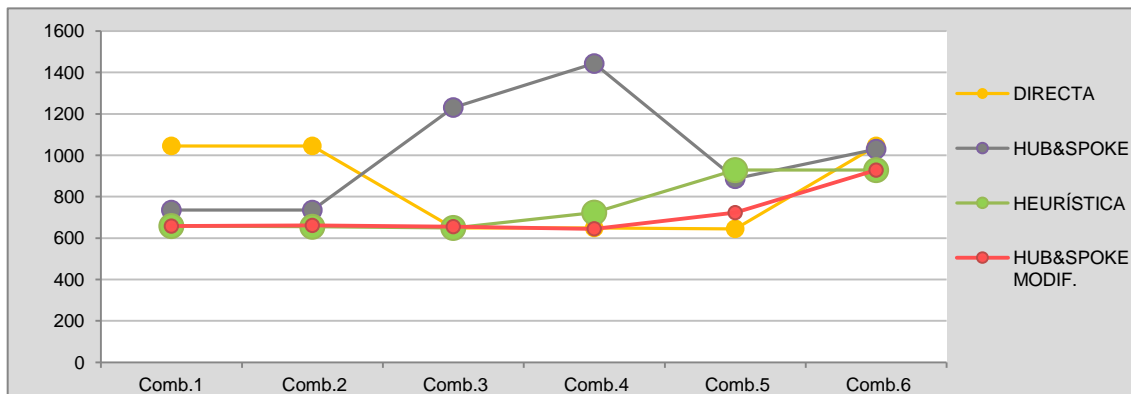


Tabla 6.3. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

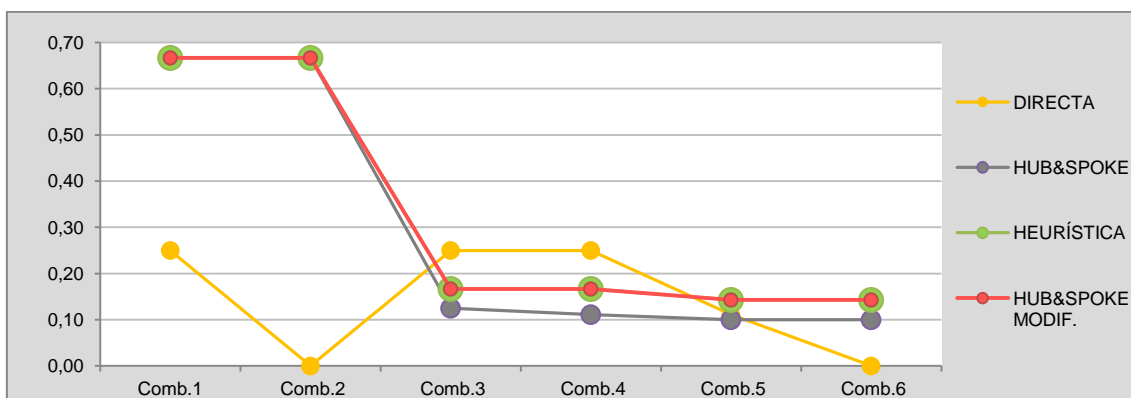


Tabla 6.4. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2

Caso 3

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

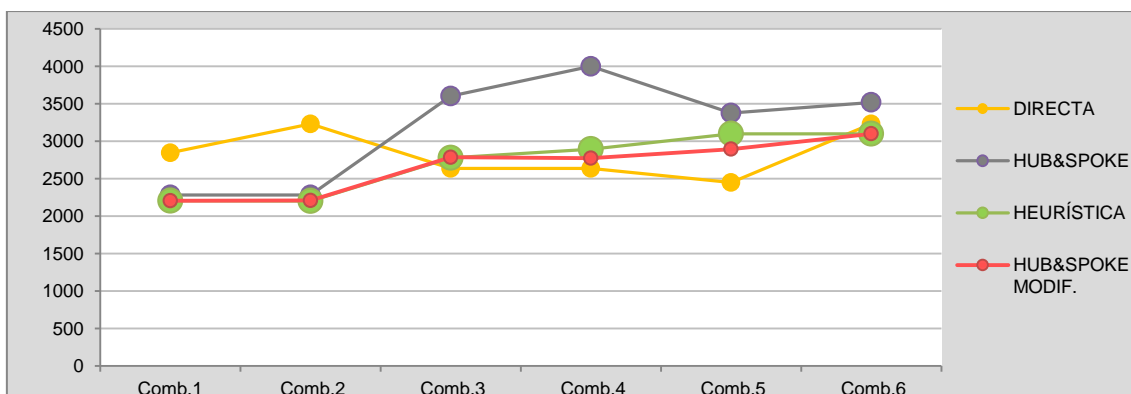


Tabla 6.5. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

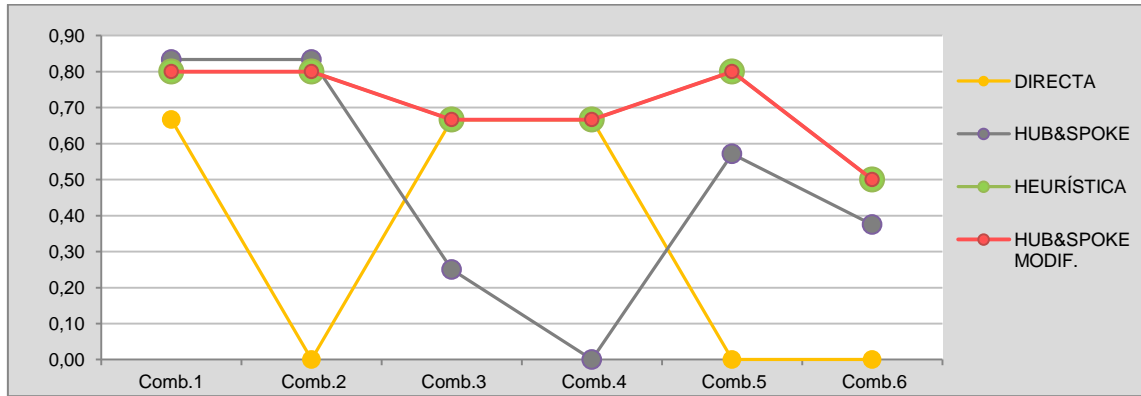


Tabla 6.6. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3

6.2 5 órdenes de envío. 21 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

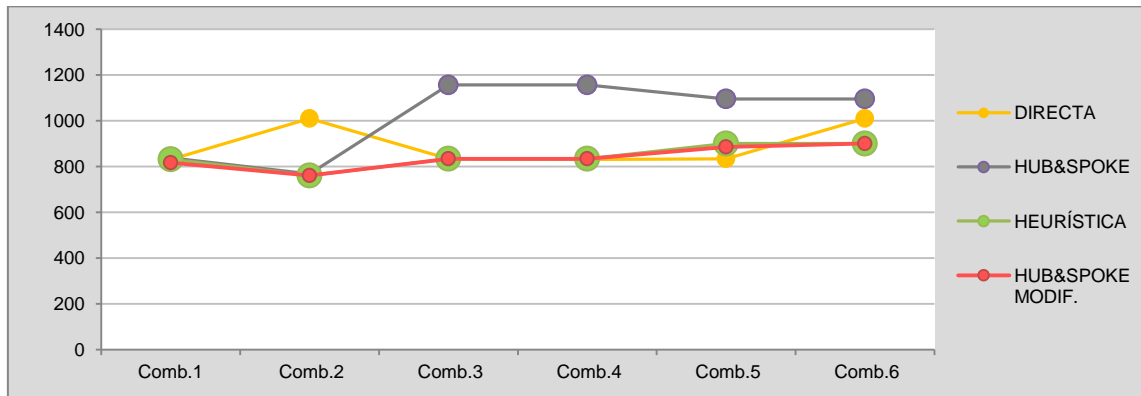


Tabla 6.7. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

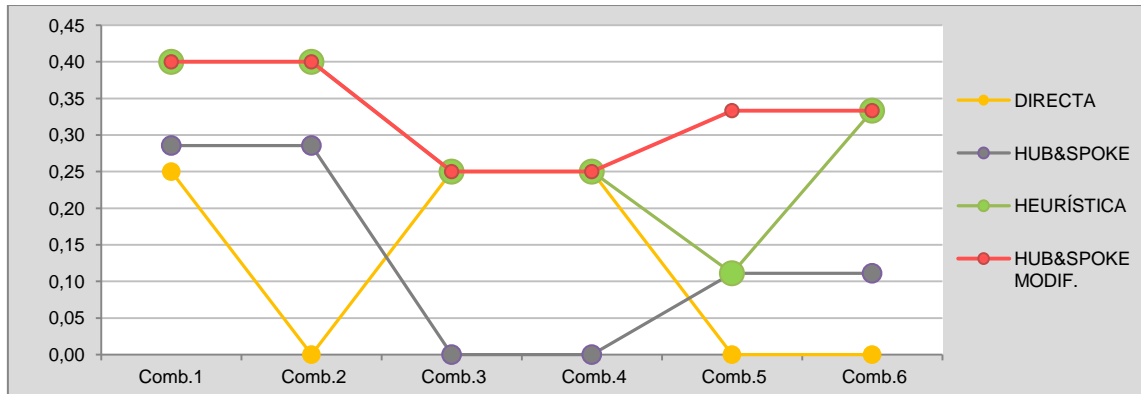


Tabla 6.8. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1

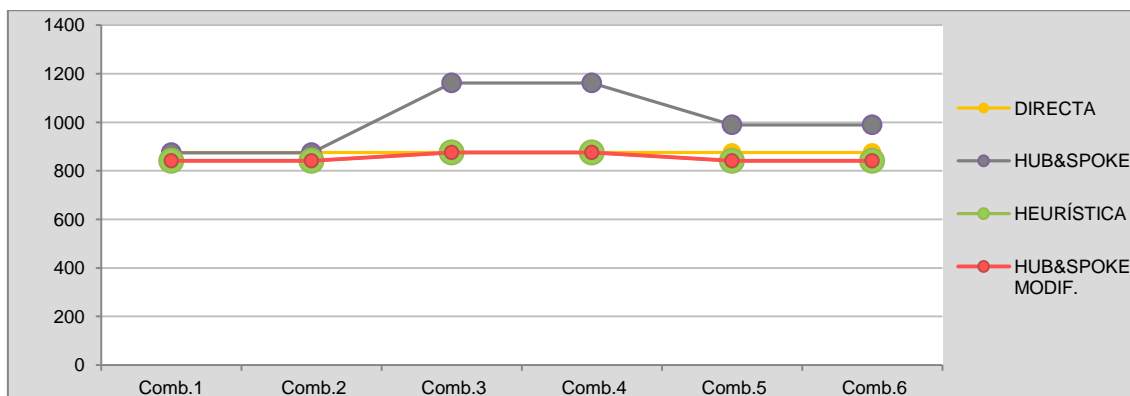
Caso 2**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.9. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2

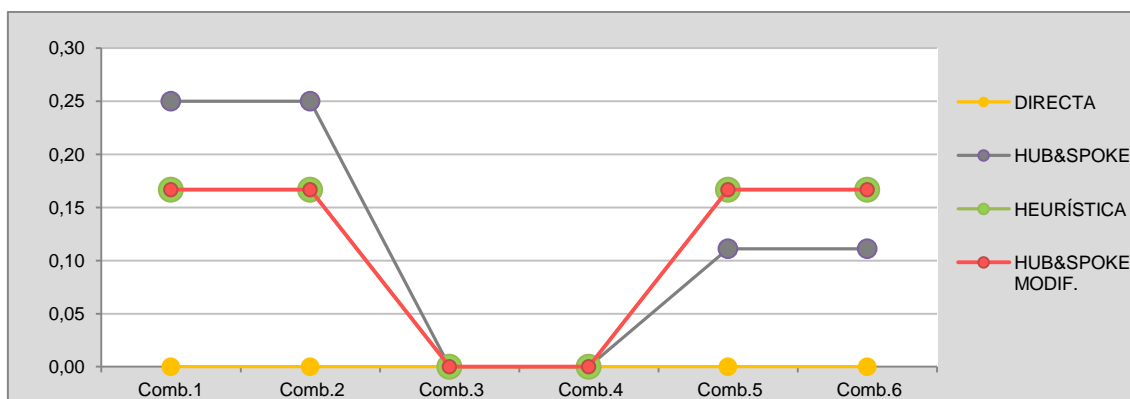
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.10. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2

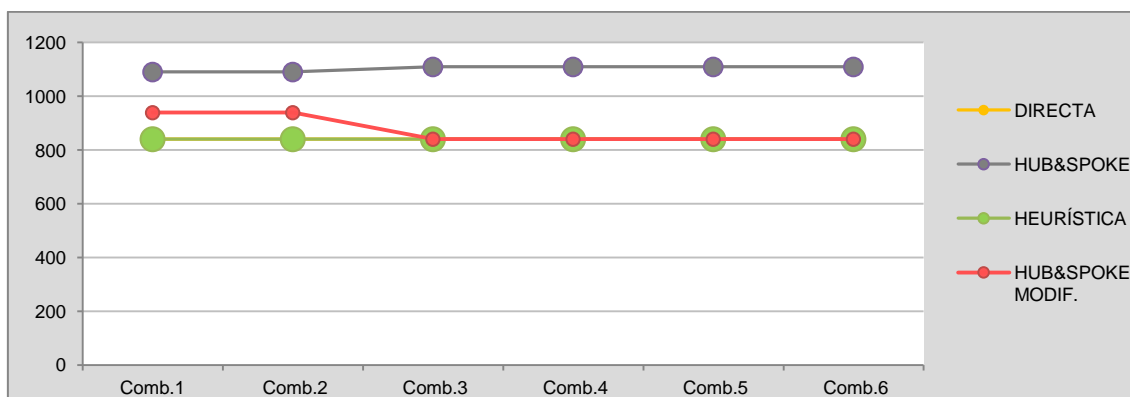
Caso 3**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.11. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

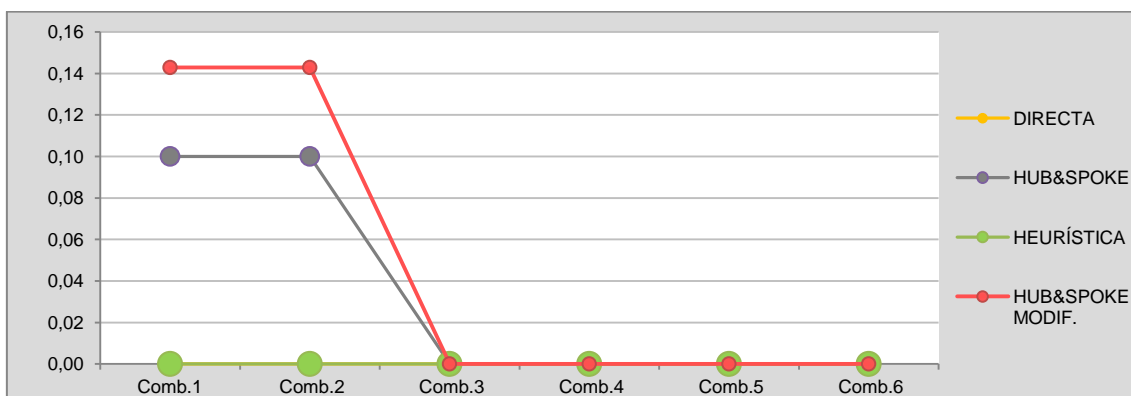


Tabla 6.12. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3

6.3 25 órdenes de envío. 3 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

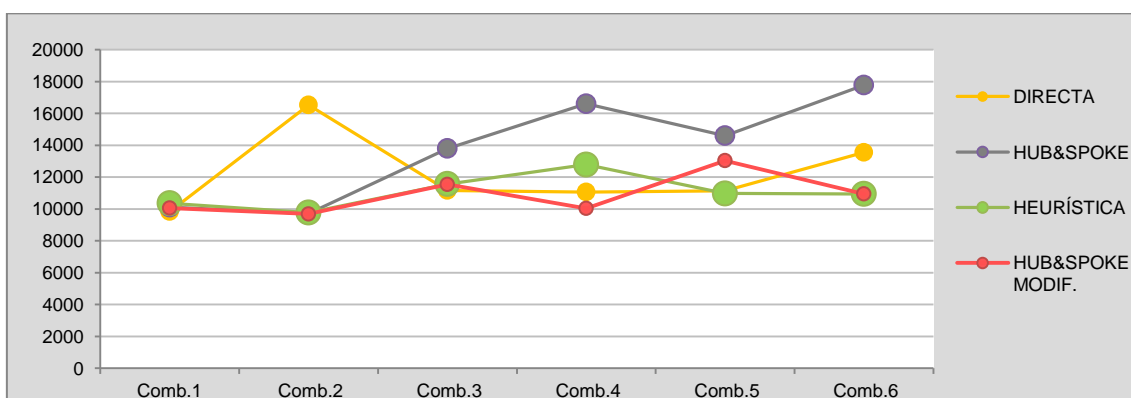


Tabla 6.13. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

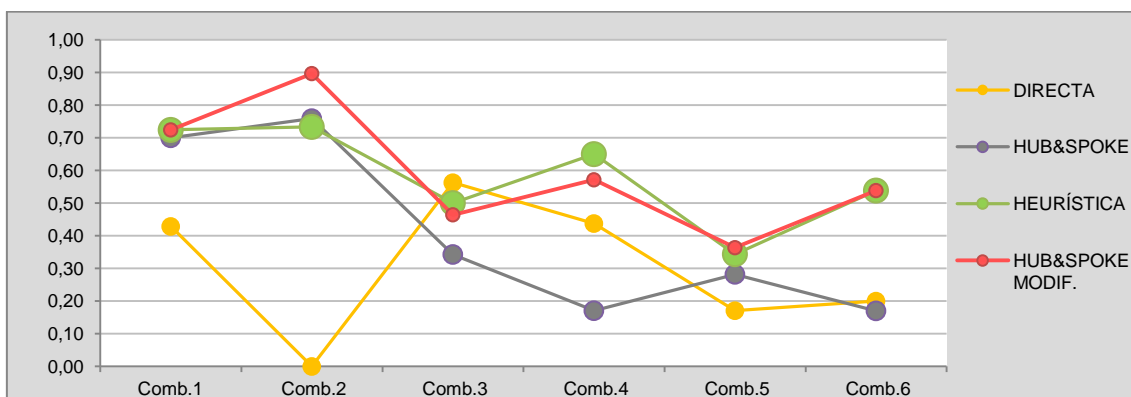


Tabla 6.14. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 1

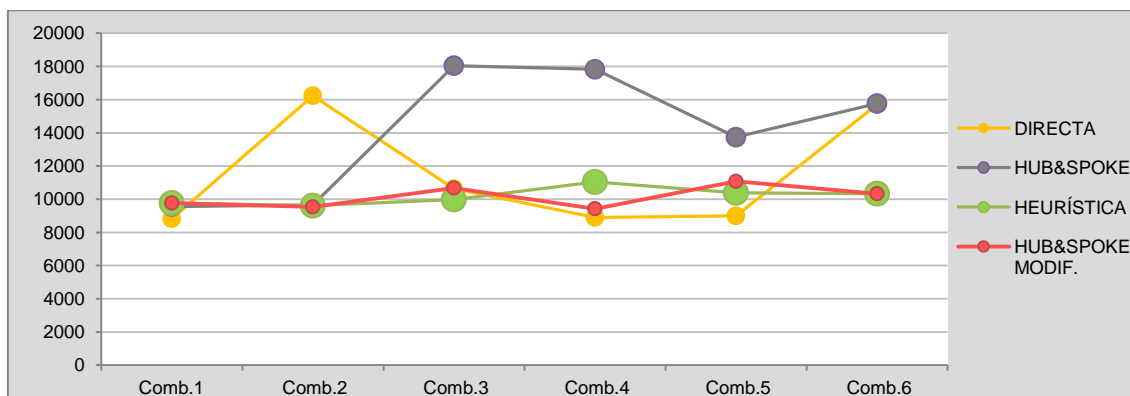
Caso 2**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.15. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 2

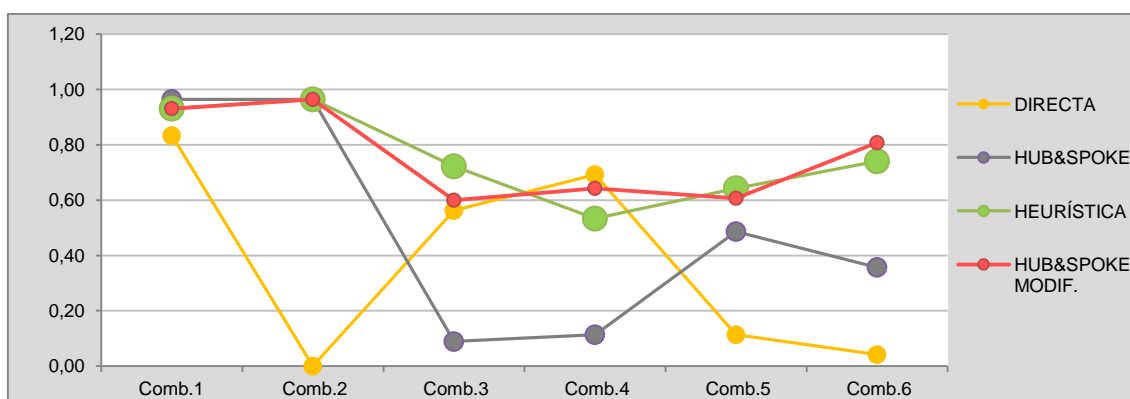
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.16. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 2

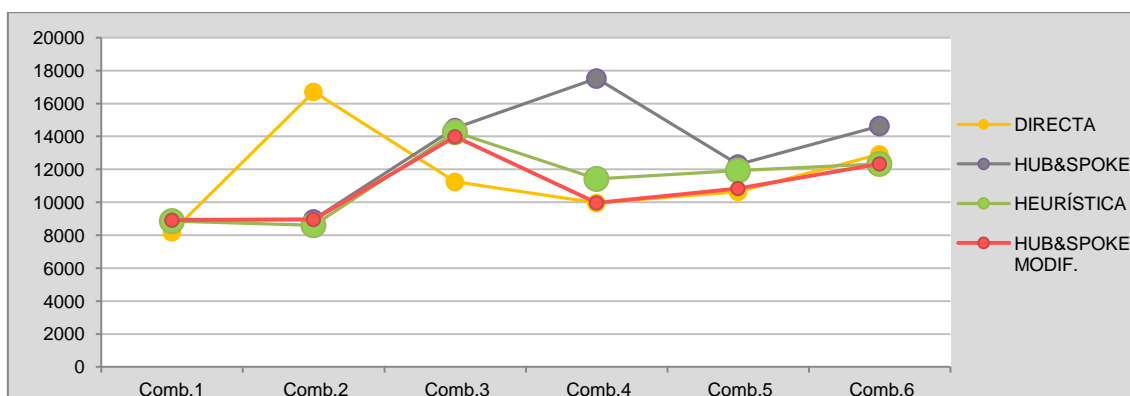
Caso 3**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.17. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 3

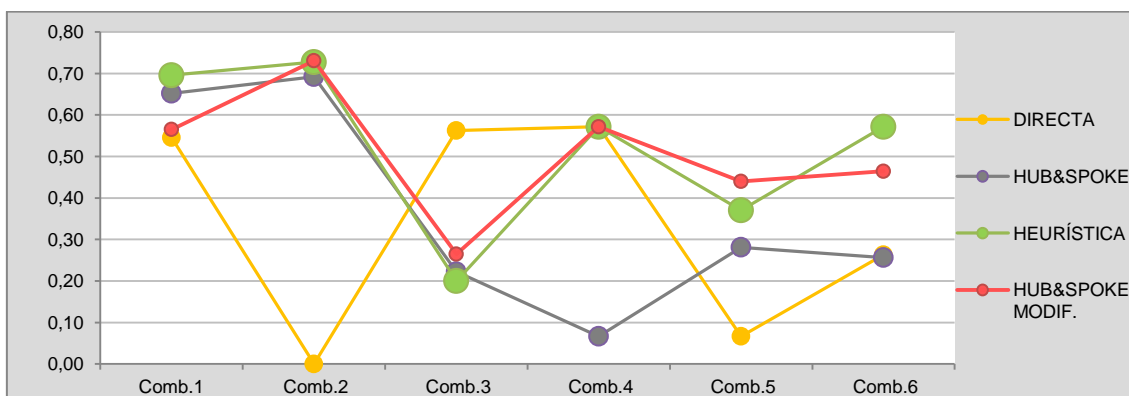
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.18. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 3

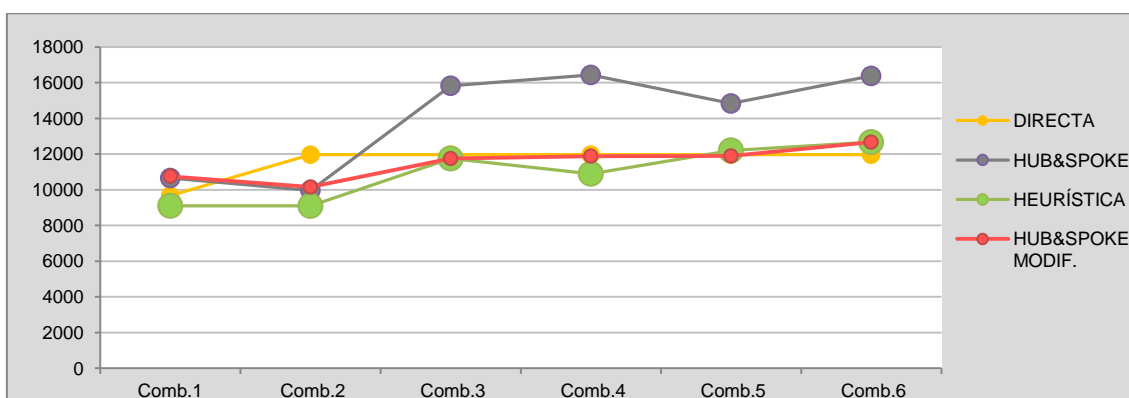
6.4 25 órdenes de envío. 21 provincias**Caso 1****COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.19. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 1

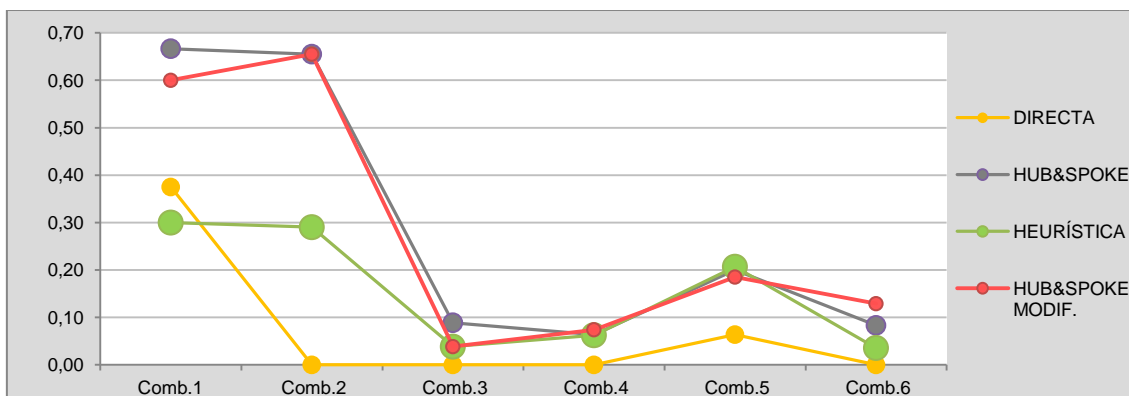
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.20. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 1

Caso 2

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

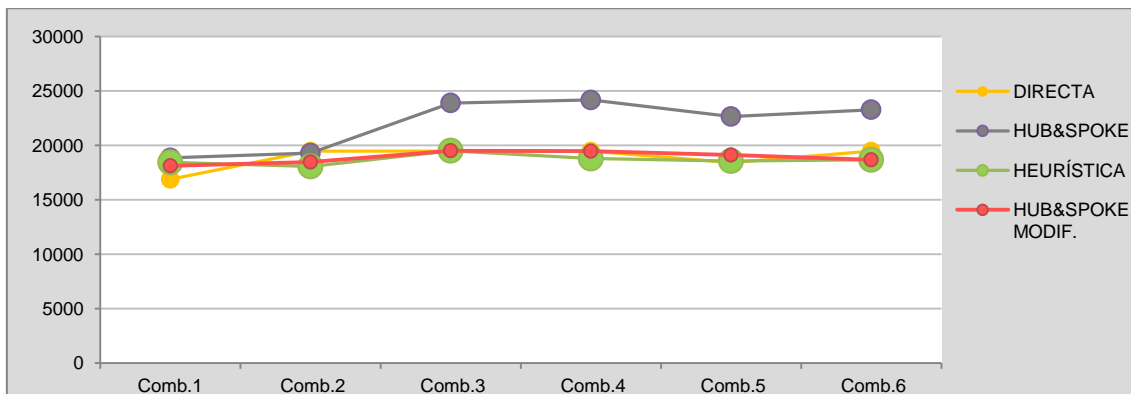


Tabla 6.21. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 2

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

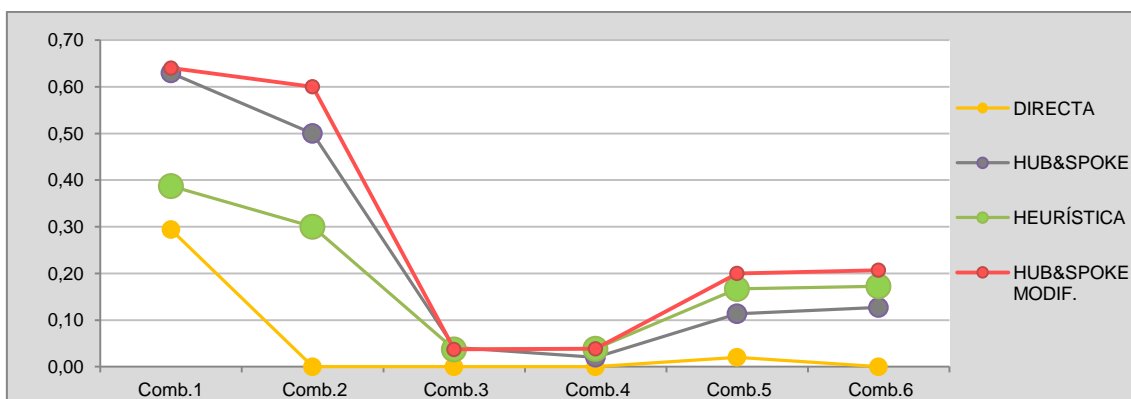


Tabla 6.22. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 2

Caso 3

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

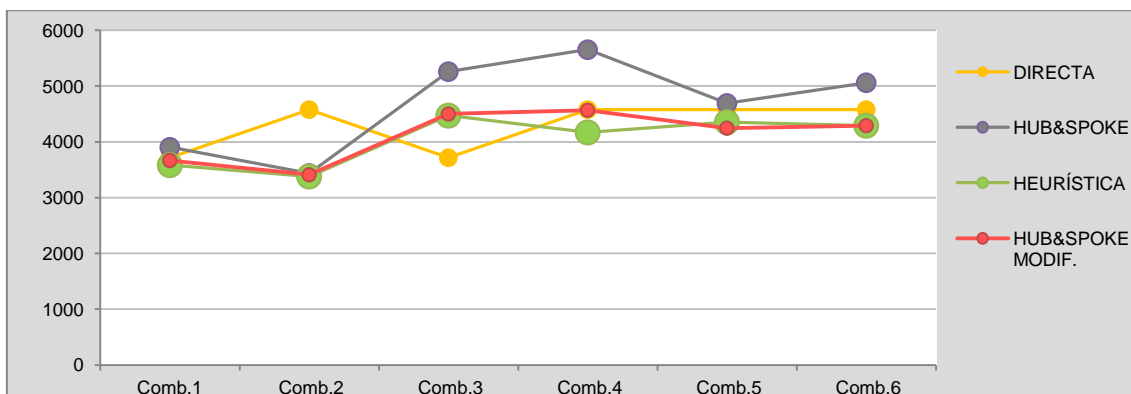


Tabla 6.23. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

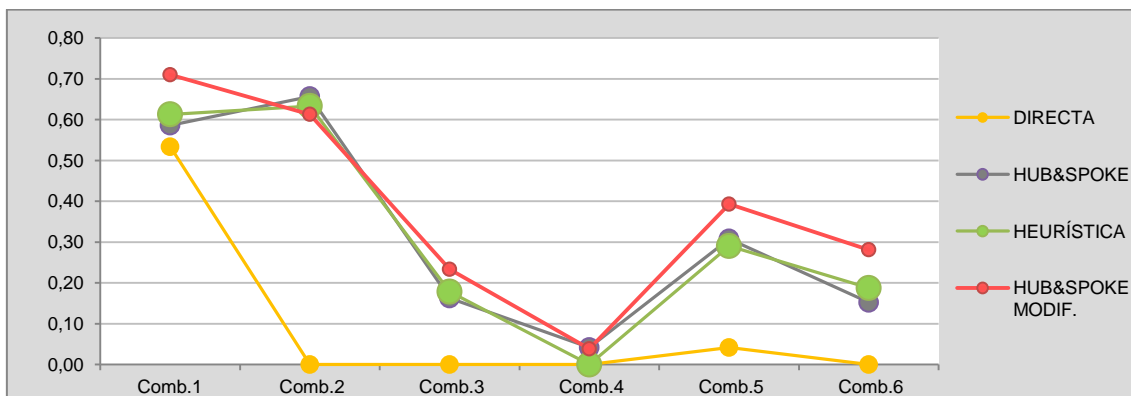


Tabla 6.24. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 3

6.5 50 órdenes de envío. 3 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

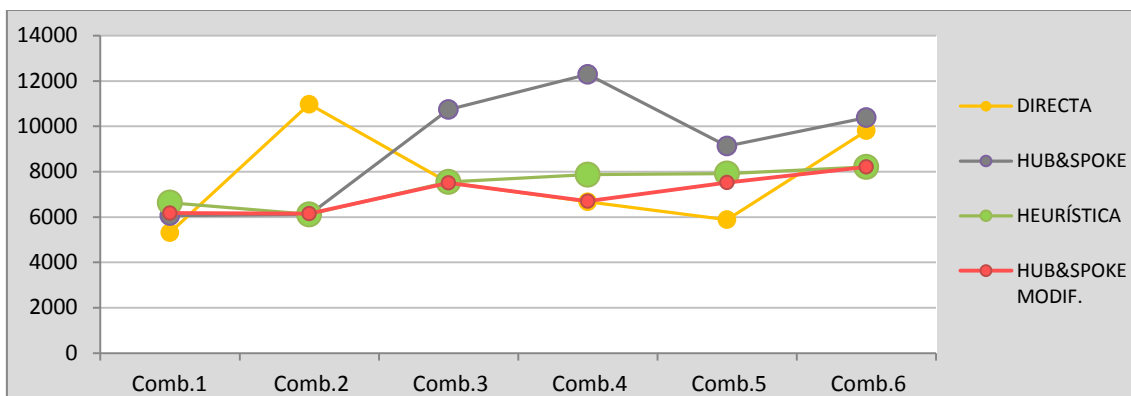


Tabla 6.25. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

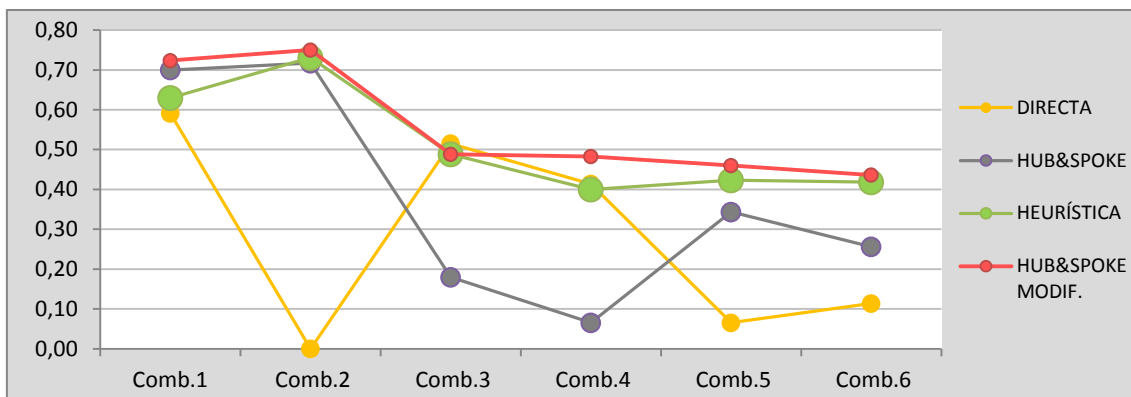


Tabla 6.26. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 1

Caso 2

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

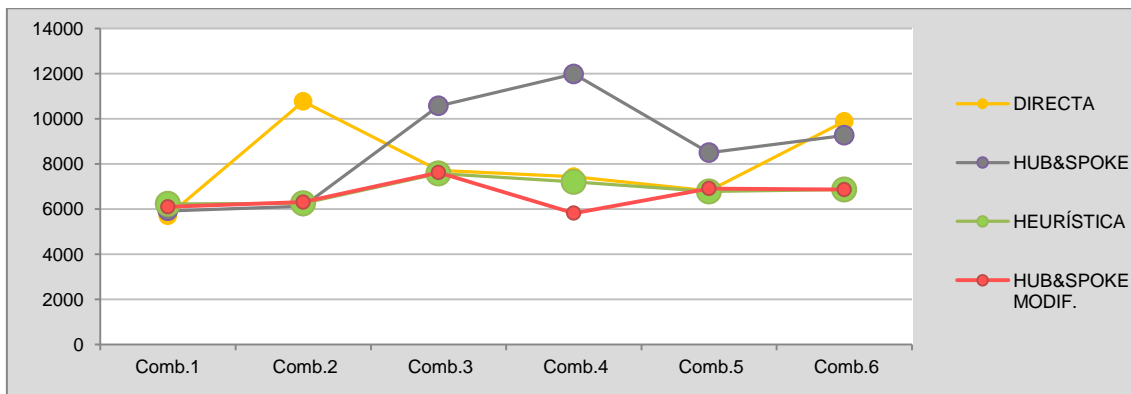


Tabla 6.27. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 2

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

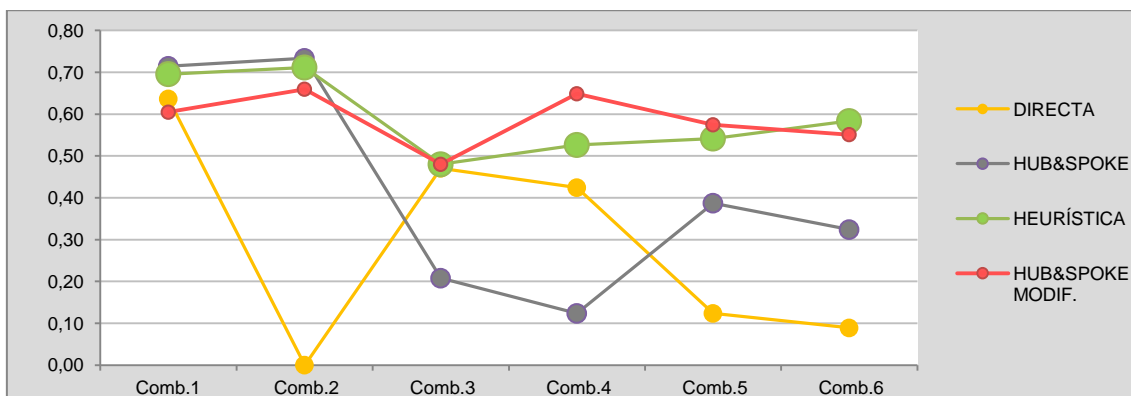


Tabla 6.28. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 2

Caso 3

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

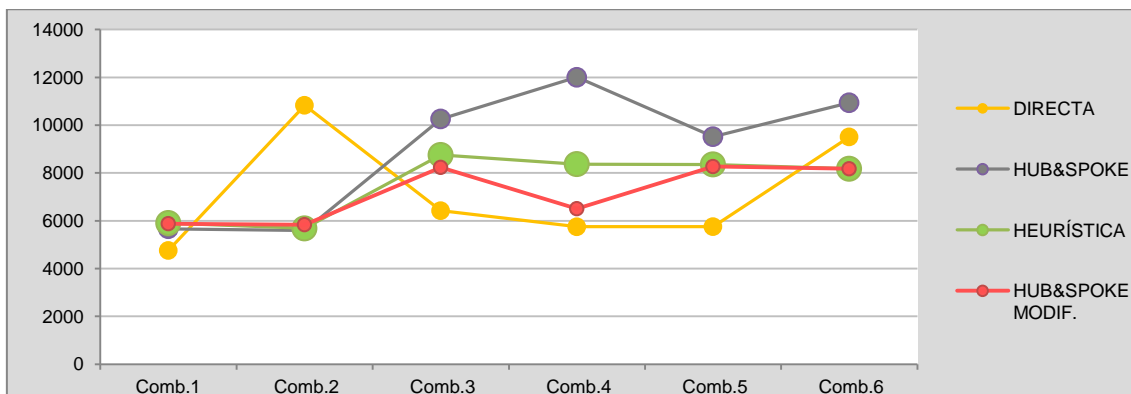


Tabla 6.29. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

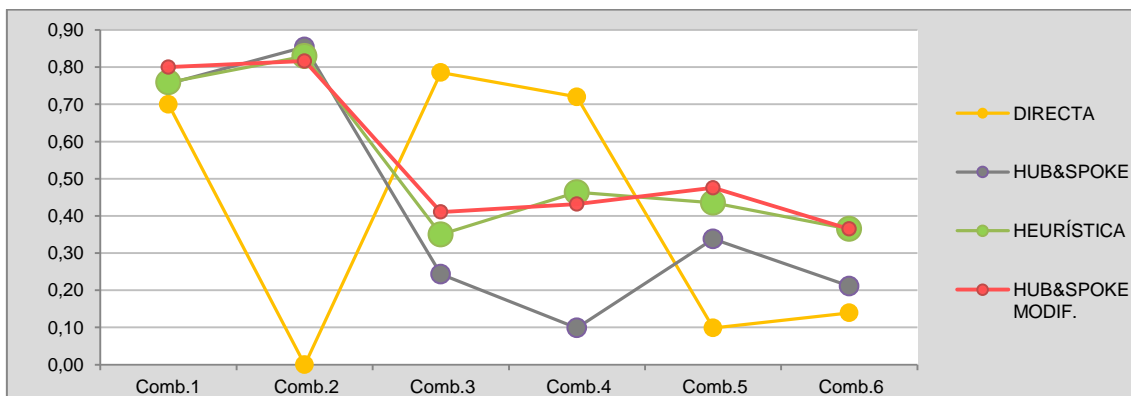


Tabla 6.30. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 3

6.6 50 órdenes de envío. 21 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

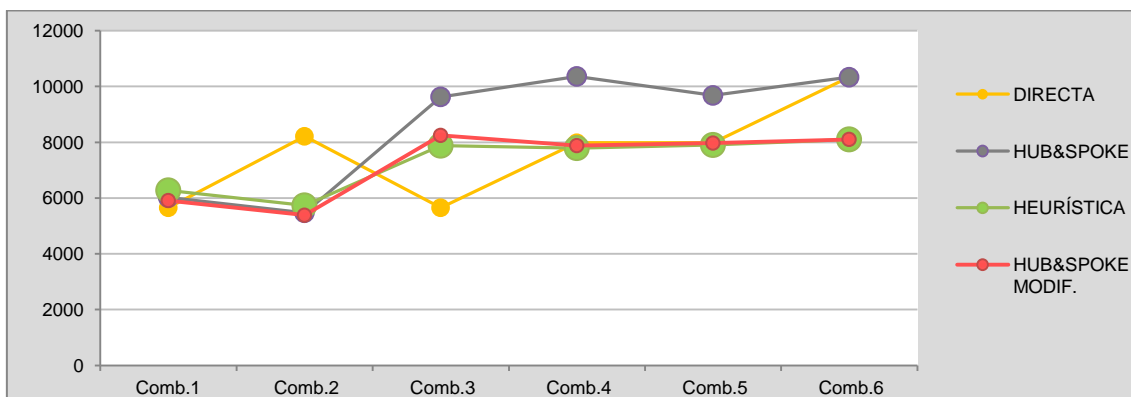


Tabla 6.31. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

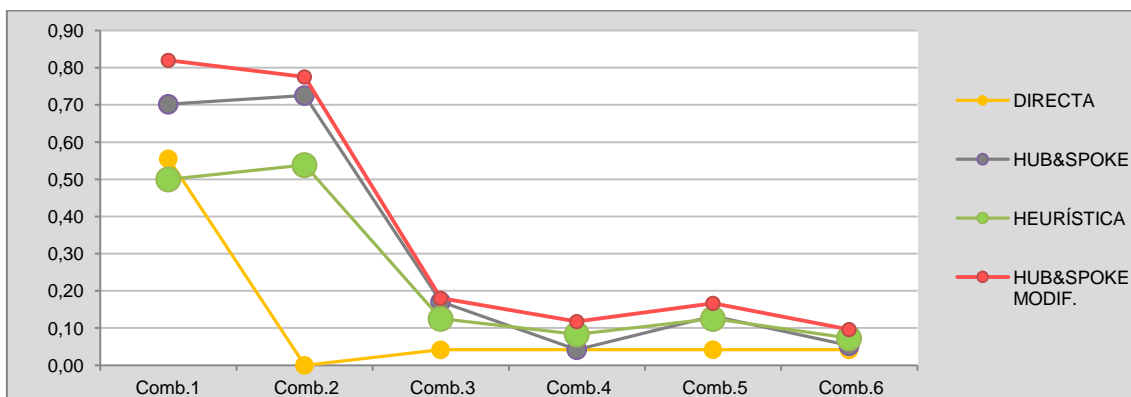


Tabla 6.32. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 1

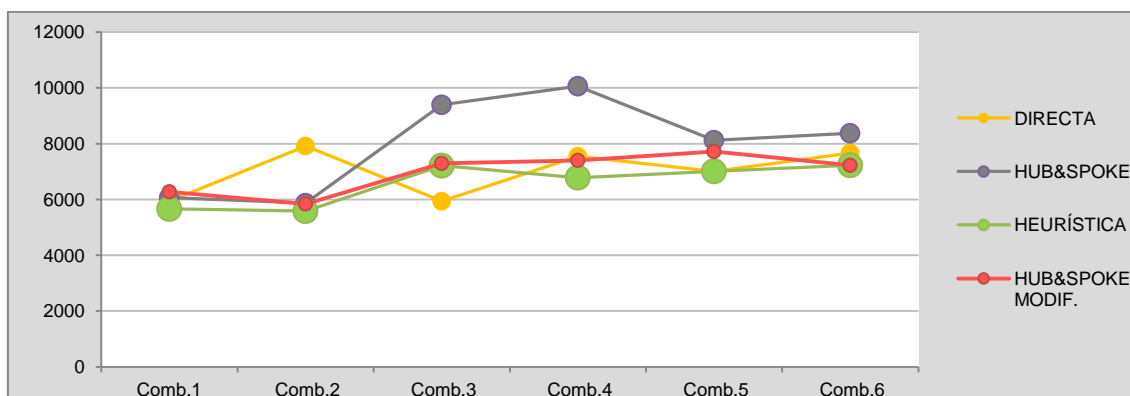
Caso 2**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.33. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 2

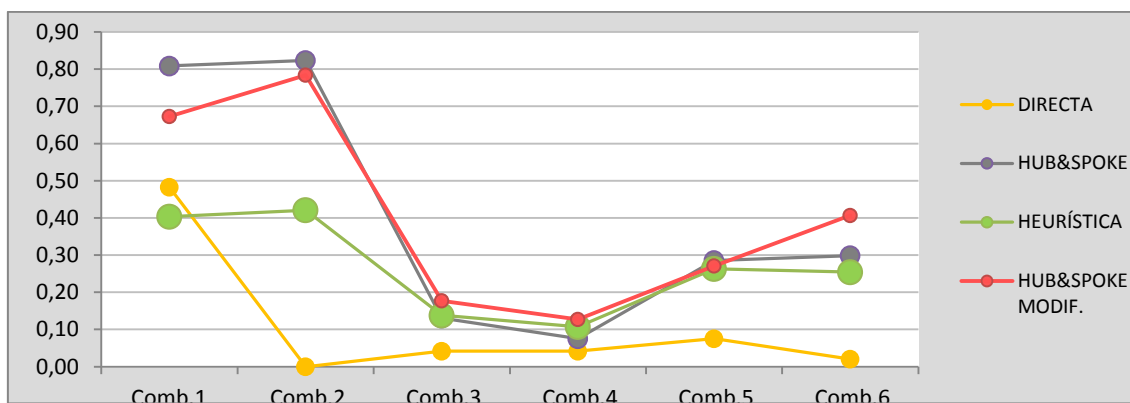
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.34. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 2

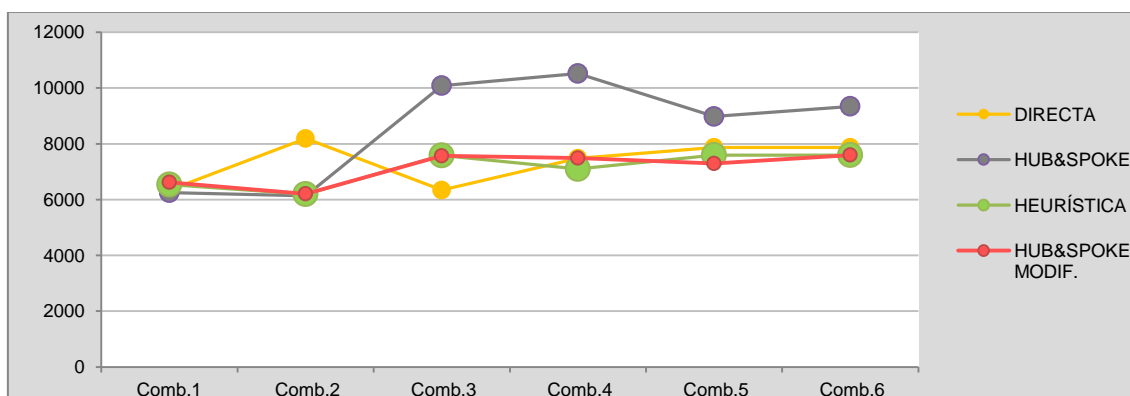
Caso 3**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.35. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

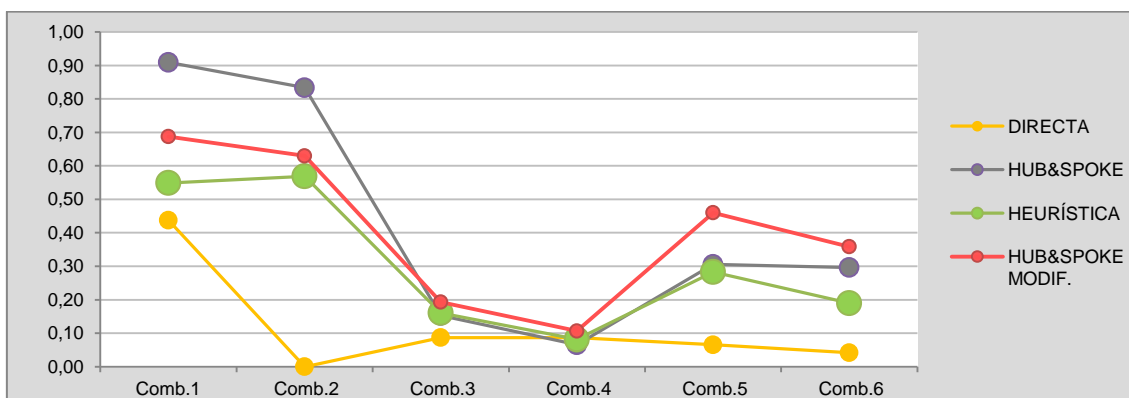


Tabla 6.36. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 3

6.7 100 órdenes de envío. 3 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

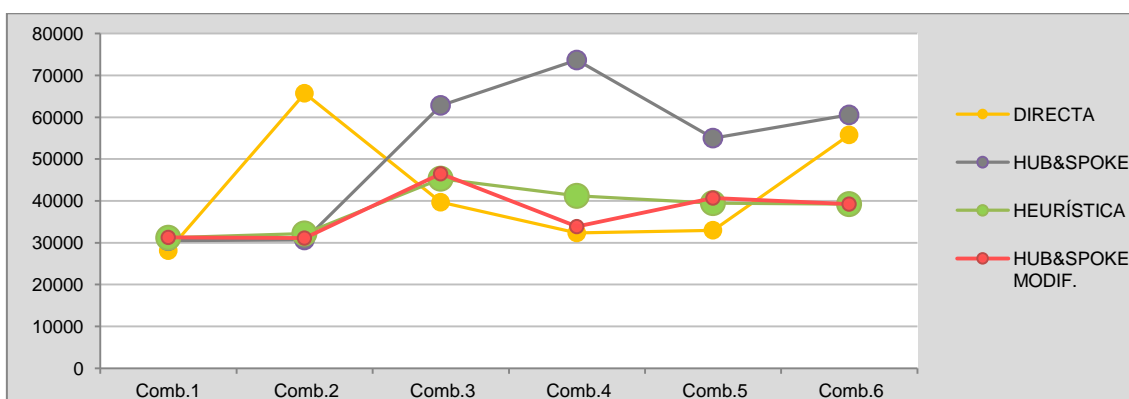


Tabla 6.37. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

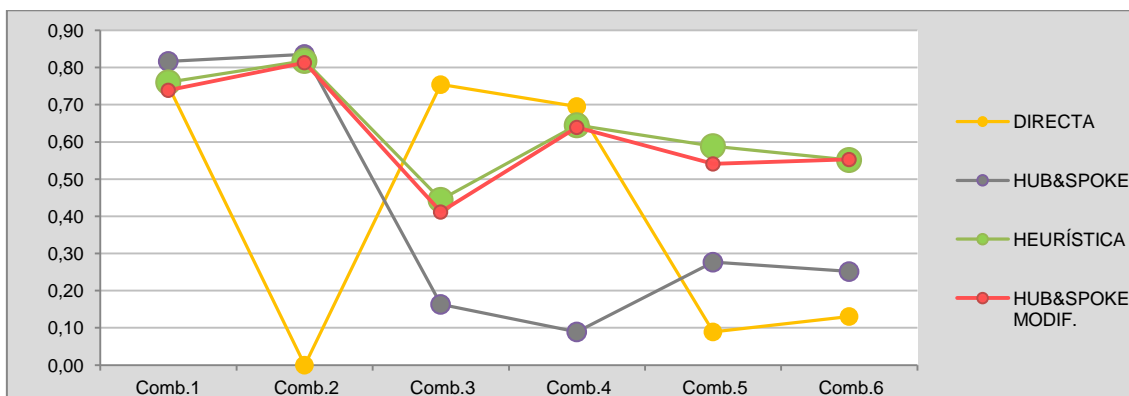


Tabla 6.38. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 1

Caso 2

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

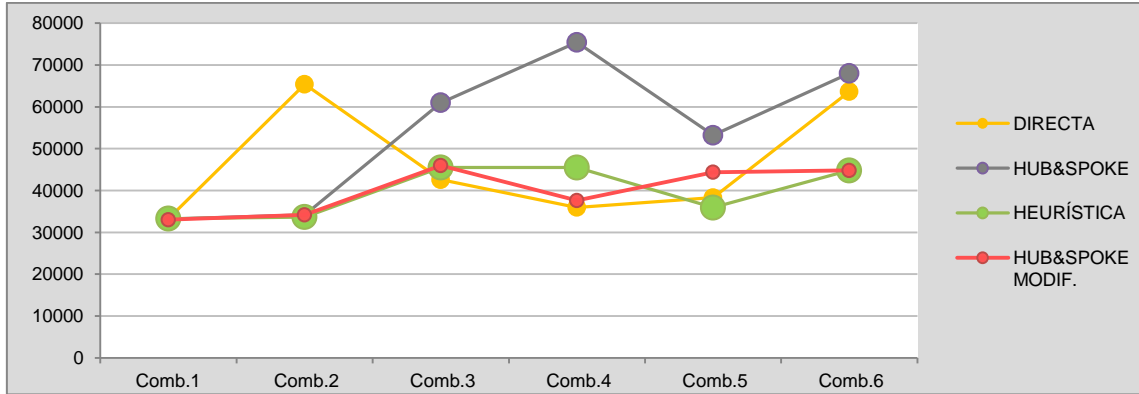


Tabla 6.39. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 2

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

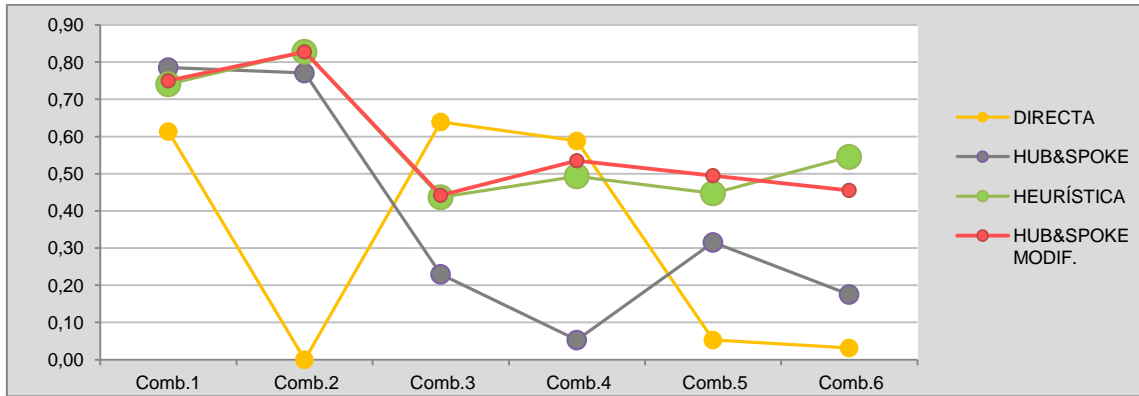


Tabla 6.40. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 2

Caso 3

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

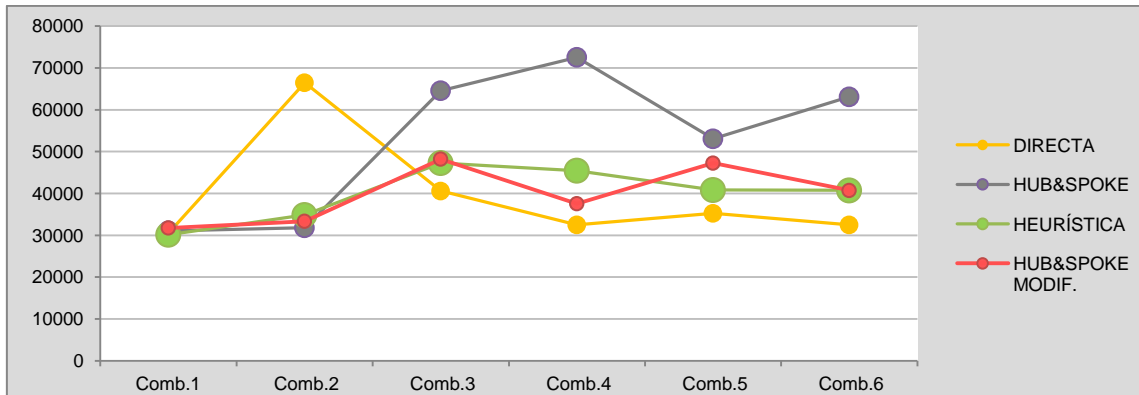


Tabla 6.41. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

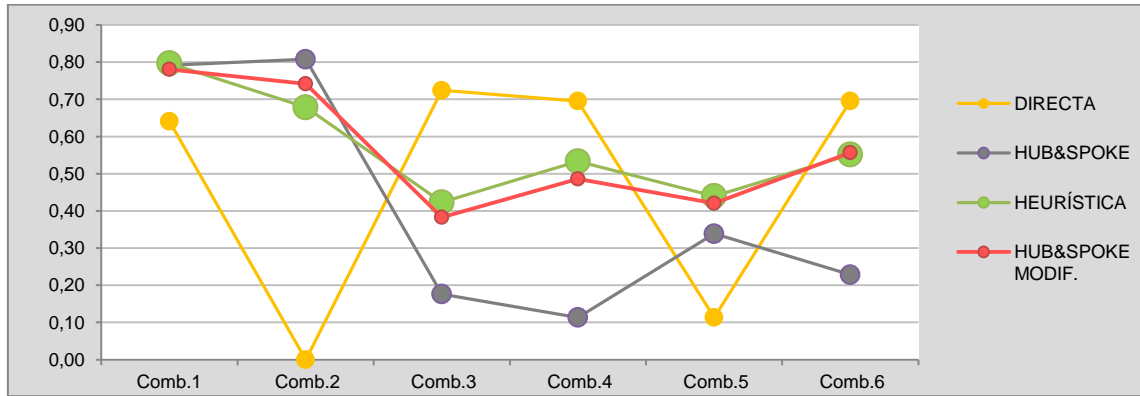


Tabla 6.42. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 3

6.8 100 órdenes de envío. 21 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

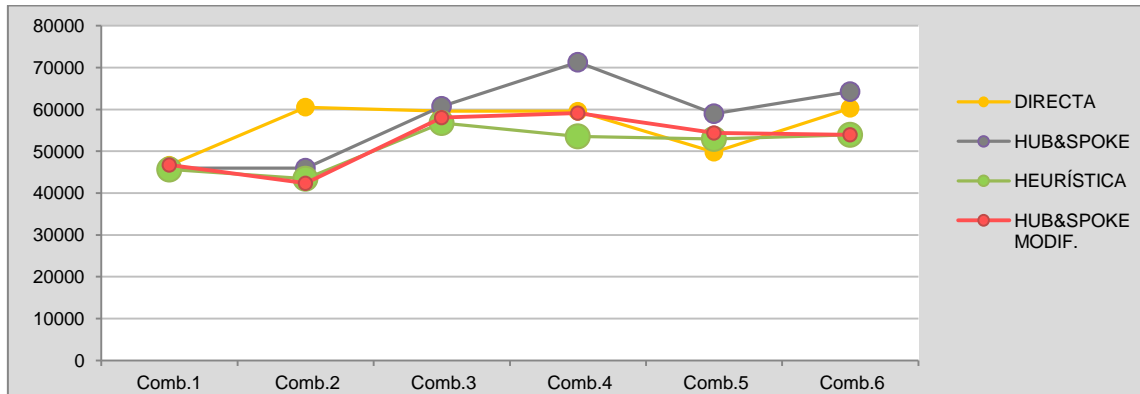


Tabla 6.43. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

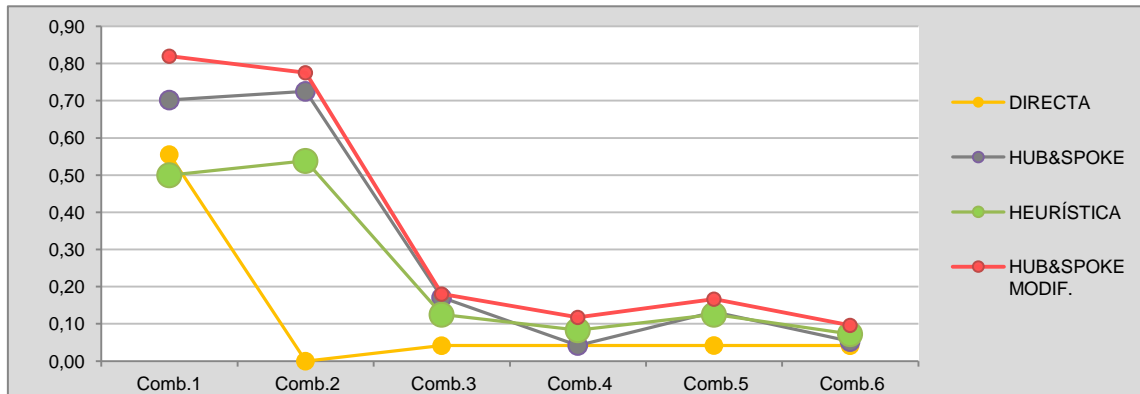


Tabla 6.44. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 1

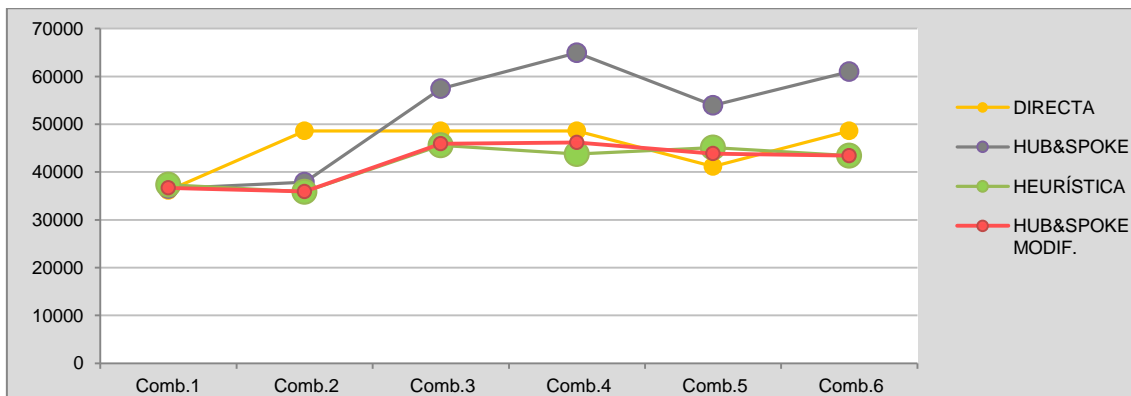
Caso 2**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.45. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 2

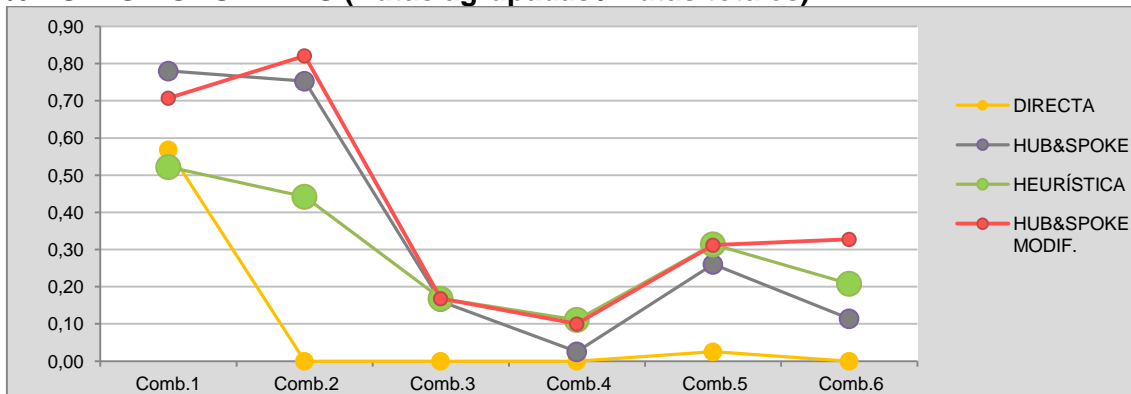
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.46. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 2

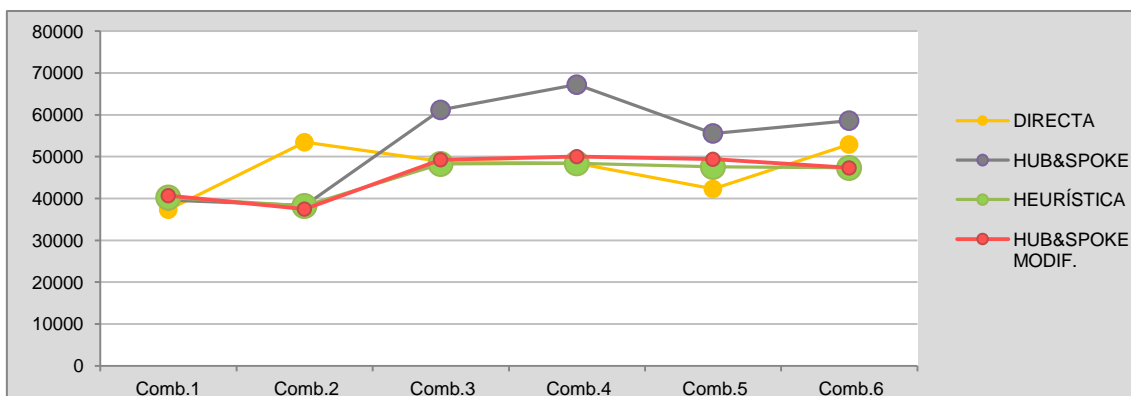
Caso 3**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.47. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

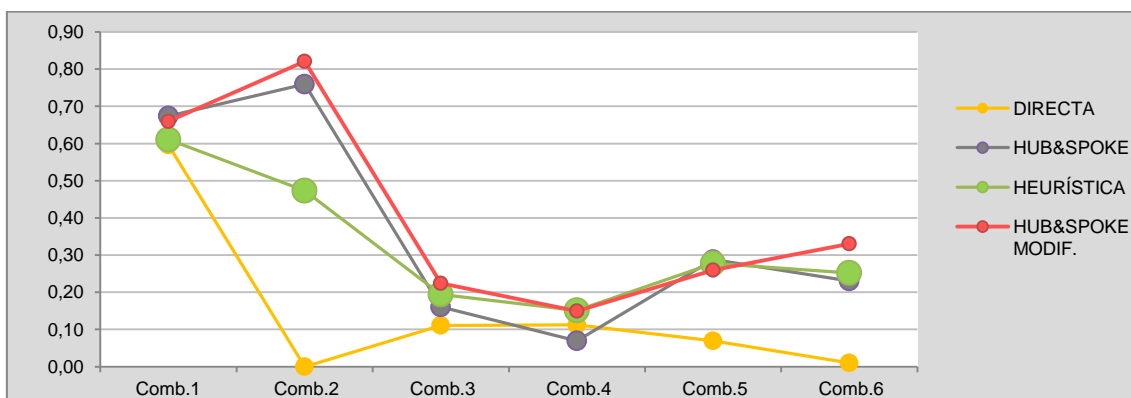


Tabla 6.48. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 3

6.9 250 órdenes de envío. 3 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

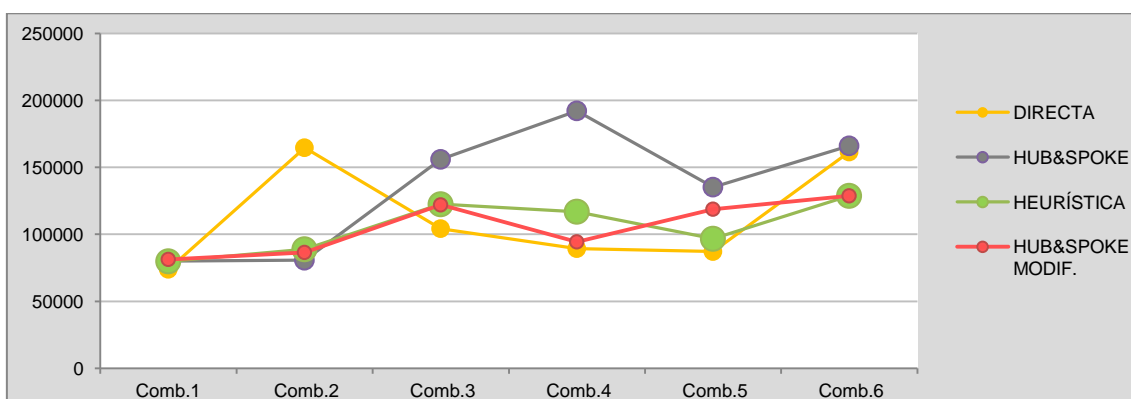


Tabla 6.49. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

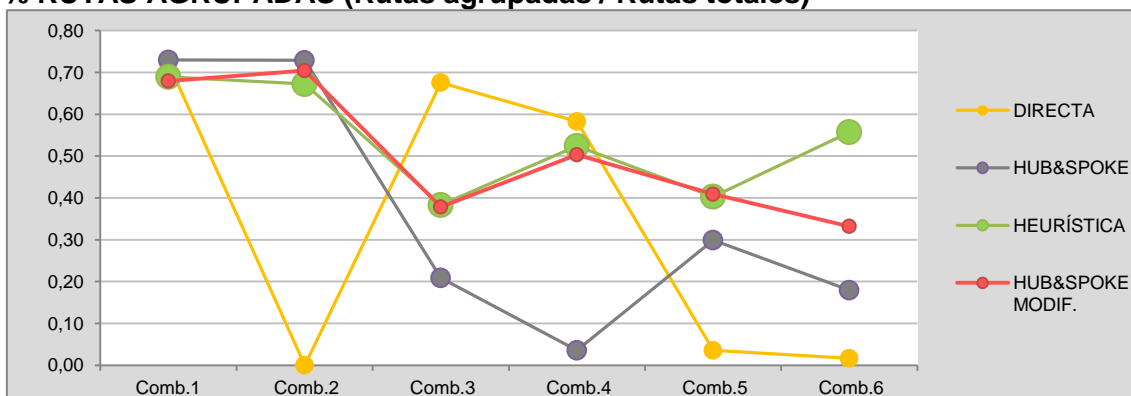


Tabla 6.50. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 1

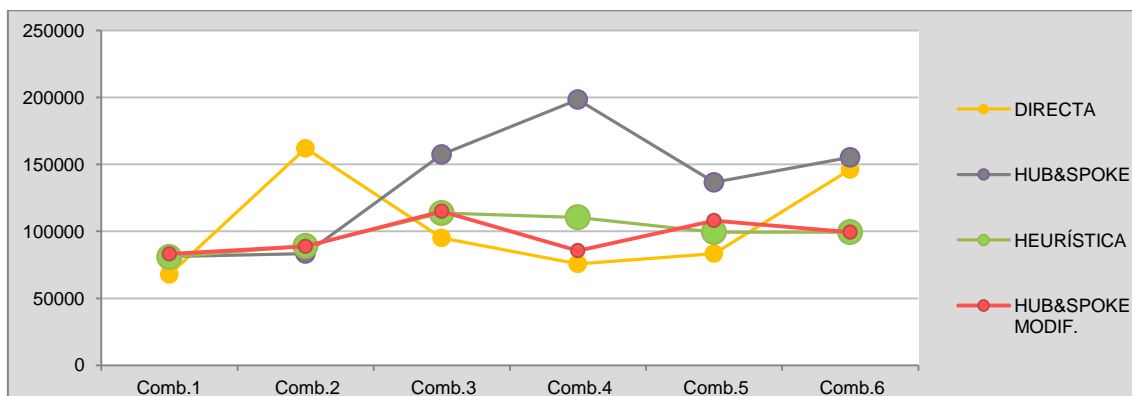
Caso 2**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.51. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 2

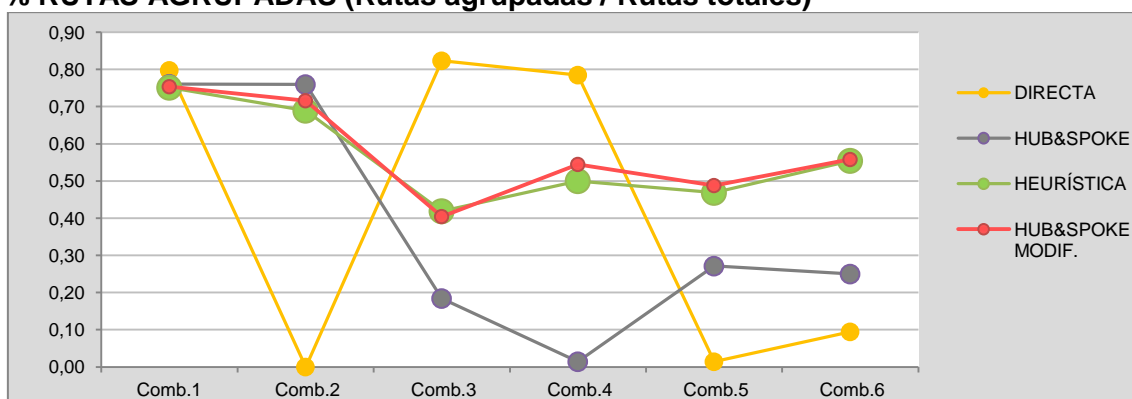
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.52. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 2

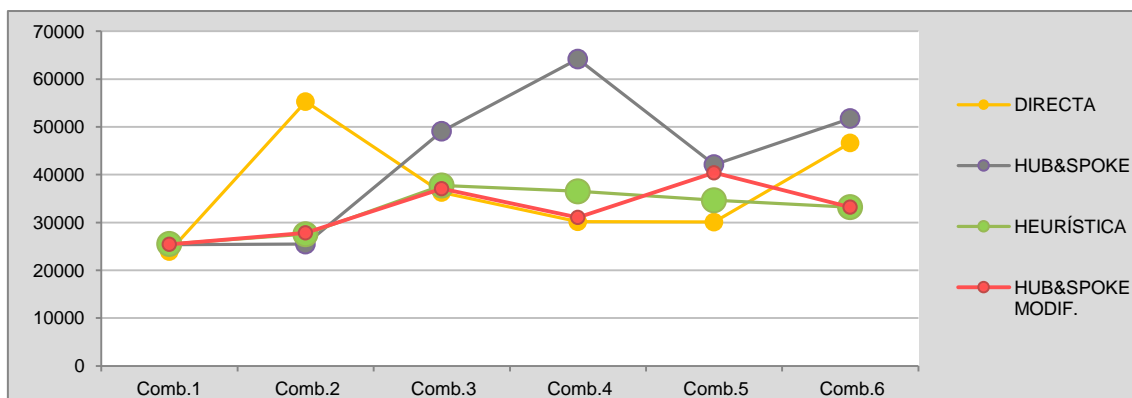
Caso 3**COSTES TOTALES DE TRANSPORTE**

Tabla 6.53. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

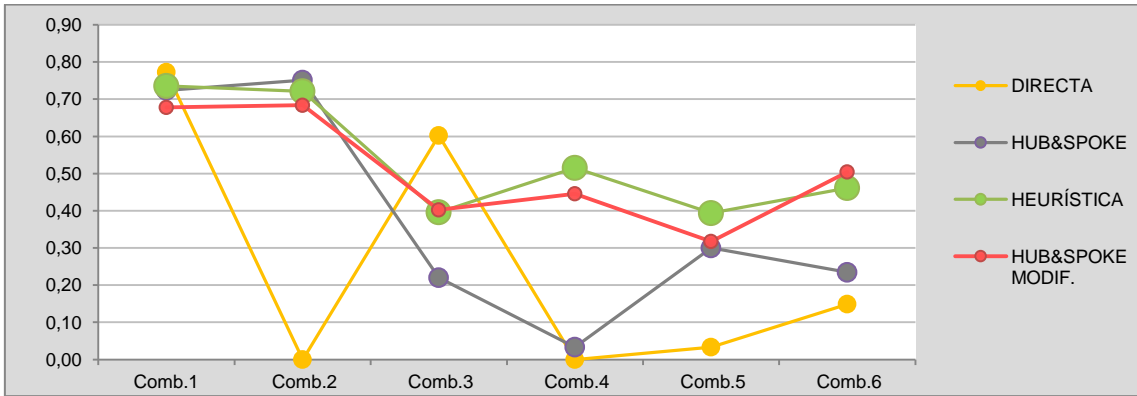


Tabla 6.54. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 3

6.10 250 órdenes de envío. 21 provincias

Caso 1

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

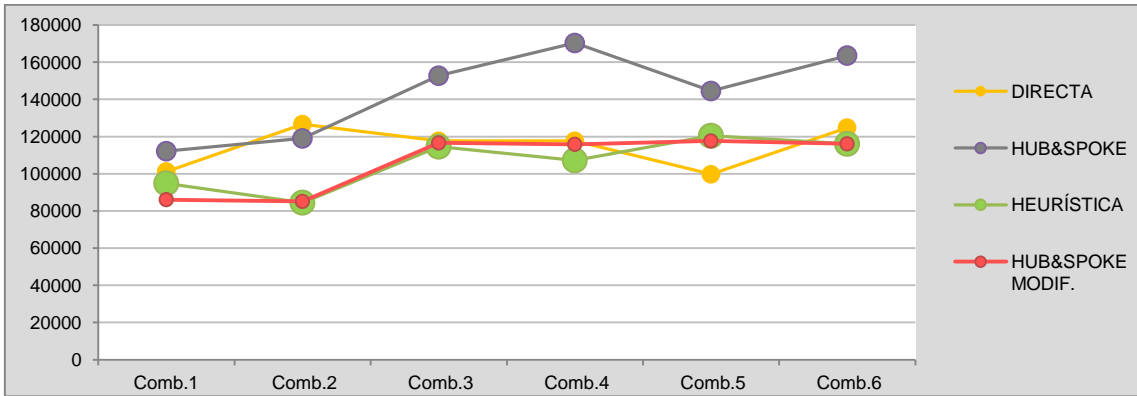


Tabla 6.55. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 1

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

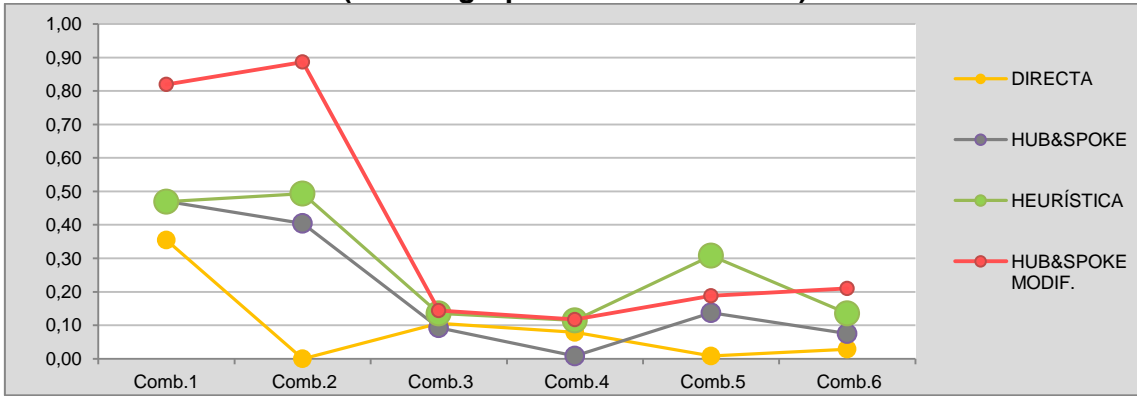


Tabla 6.56. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 1

Caso 2

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

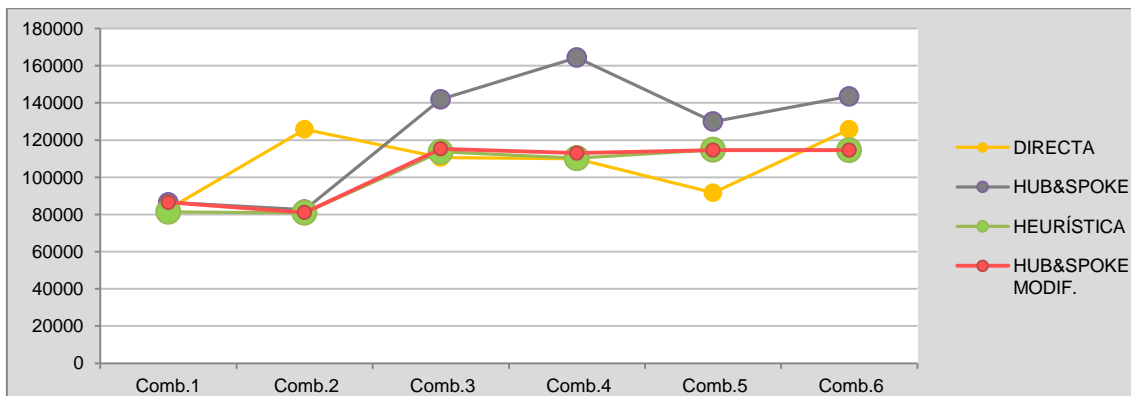


Tabla 6.57. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3

% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

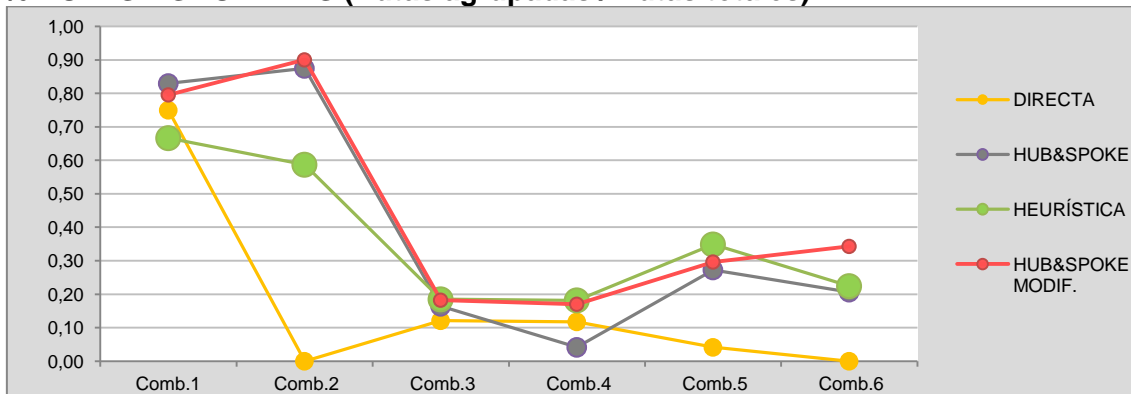


Tabla 6.57. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 2

Caso 3

COSTES TOTALES DE TRANSPORTE

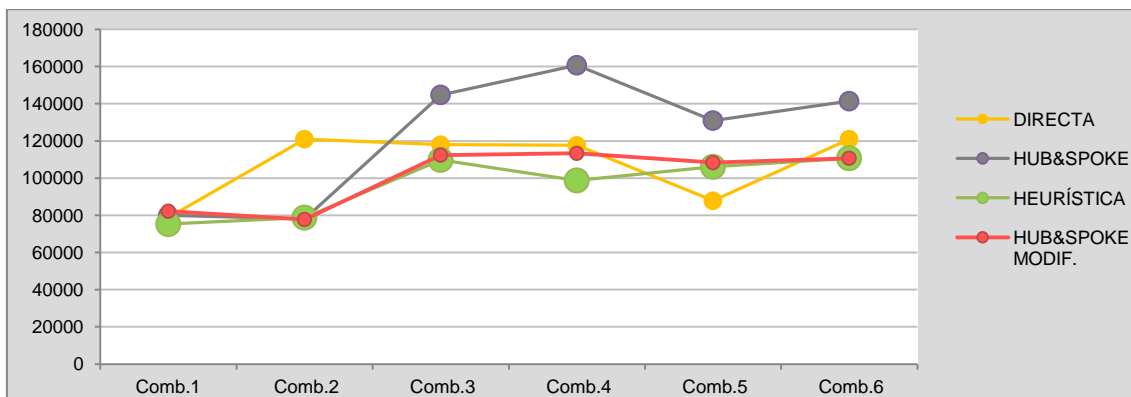


Tabla 6.59. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3

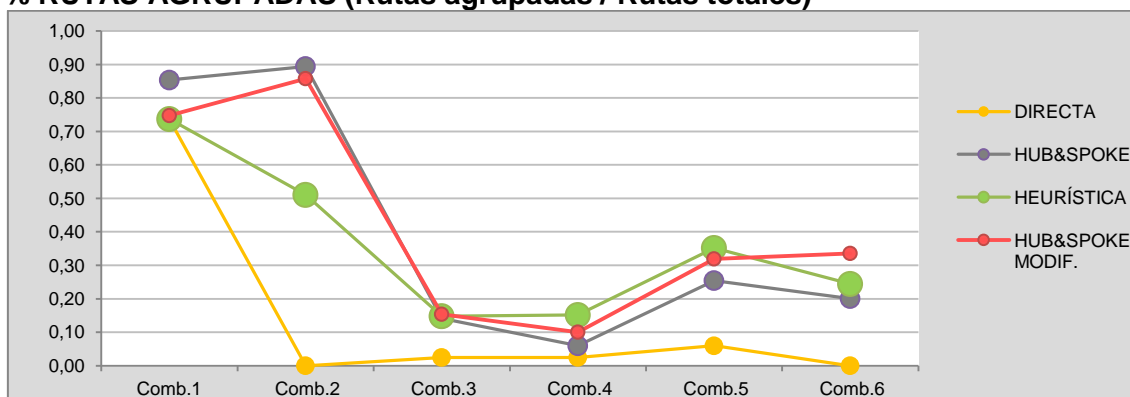
% RUTAS AGRUPADAS (Rutas agrupadas / Rutas totales)

Tabla 6.60. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3

ANEXO VII

Análisis detallado de 5 órdenes de envío

7.1. Introducción

Con el fin de comprender mejor la metodología del algoritmo utilizado y comprobar su validez, se ha realizado un análisis detallado de las simulaciones en los casos de tamaño del problema pequeño, es decir, de los casos de 5 órdenes de envío.

Como se ha comentado en la memoria, para cada combinación que aparecen en la tabla 7.1, se realizan 6 simulaciones, 3 de ellas con los nodos concentrados en 3 provincias alejadas entre sí (Huelva, Lugo y Valencia) y las otras 3 con los nodos repartidos en 21 provincias. Los resultados para cada caso aparecen en las tablas siguientes. Para tamaños de problema mayores, este análisis sería inviable.

	Espera	Diferencia temporal
Combinación 1	Sí	Grande
Combinación 2	No	Grande
Combinación 3	Sí	Ajustada
Combinación 4	No	Ajustada
Combinación 5	Sí	Mixta
Combinación 6	No	Mixta

Tabla 7.1 Combinaciones de parámetros de simulación

7.2 5 órdenes de envío en 3 provincias

7.2.1 Caso 1

El primer caso de simulación, presenta un escenario con 5 órdenes de envío. Como se ha explicado, para unos mejores resultados se realizan 3 simulaciones con las mismas condiciones. A continuación se va a hacer un análisis detallado de la primera simulación.

Para comenzar, se generan de forma aleatoria los nodos de origen y destino de los envíos. En este primer caso, los nodos se encuentran concentrados en las provincias de Huelva, Lugo y Valencia. En las tablas 7.2, 7.3 y 7.4 se muestran los nodos junto con las ventanas temporales de recogida y de entrega de mercancías y el número de pallets que se envían en cada orden. Los nodos deben ser visitados siempre por debajo del límite superior de su ventana temporal y por encima del límite inferior en el caso de no permitir espera.

Con la notación que se ha utilizado, aparecen las ventanas temporales en minutos. El inicio de cada ruta se produce en el límite inferior de la ventana de recogida de la primera orden de esa ruta. Para todos los casos se ha escogido una ventana de recogida entre 840 y 1140 minutos. La ventana de recogida, expresada en horas, quedaría así:

- Límite inferior de la ventana de recogida: $840 \text{ min} / 60 = 14 \text{ h} \rightarrow 14:00$
- Límite superior de la ventana de recogida: $1140 \text{ min} / 60 = 19 \text{ h} \rightarrow 19:00$

Las ventanas de entrega dependen del caso seleccionado. En el primer caso, tabla 7.2, se toma una diferencia entre las ventanas grande, de 720 minutos (12 horas), y es común en todas las órdenes. La ventana de entrega quedará así:

- Límite inferior de la ventana de entrega: $1860 \text{ min} / 60 = 31 \text{ h}$ (Como es mayor que 24 horas, la entrega será el día siguiente) $\rightarrow 7:00$ del día siguiente al día de recogida.
- Límite superior de la ventana de entrega: $2160 \text{ min} / 60 = 36 \text{ h} \rightarrow 12:00$ del día siguiente al día de recogida.

En la tabla 7.3, la diferencia entre la recogida y la entrega es ajustada. La ventana de entrega se calcula sumando el tiempo necesario para llegar al destino. Así, la ventana de recogida es la misma para todos los envíos, pero la ventana de entrega es distinta, en función de la distancia a la que se encuentran los nodos de origen y destino.

En la tabla 7.4, aparecen las órdenes de envío para una diferencia de ventana mixta. En esta situación se asigna aleatoriamente una diferencia entre ventanas grande o ajustada a cada orden de envío. En este caso, las órdenes de envío 1 y 4 tienen una diferencia de ventana amplia y las órdenes 2, 3 y 5 tienen una diferencia de ventana ajustada.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	840	1140	1860	2160	13
2	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	15
3	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	840	1140	1860	2160	3
4	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	2
5	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	7

Tabla 7.2 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	840	1140	1448	1748	13
2	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1356	1656	15
3	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	840	1140	1415	1715	3
4	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	840	1140	1360	1660	2
5	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	840	1140	1410	1710	7

Tabla 7.3 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	840	1140	1860	2160	13
2	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1356	1656	15
3	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	840	1140	1415	1715	3
4	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	2
5	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	840	1140	1410	1710	7

Tabla 7.4 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana mixta

Situación de partida

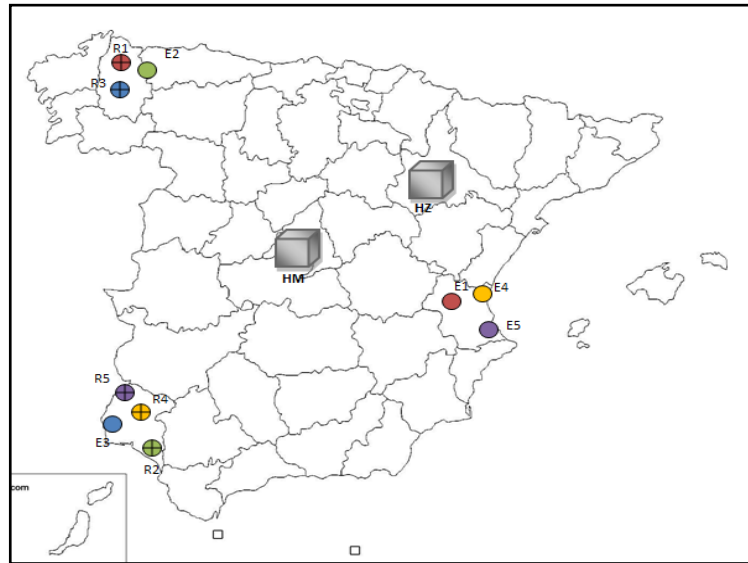


Figura 7.1. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Localización de nodos

La localización de los nodos de las órdenes de este primer escenario se muestra en la figura 7.1. Cada par de nodos de origen y destino se ha representado de un color. Los nodos denominados R hacen referencia a la operación de recogida de la orden del número que lleva asociado, mientras que los denominados E, hacen referencia a la operación de entrega. Por ejemplo, los nodos {R1} y {E1} corresponden a la recogida y entrega, respectivamente, de la orden 1.

A continuación y apoyados con el mapa de la figura 7.1 se van a mostrar las posibilidades que a priori se podrían dar dependiendo de la estrategia elegida, para poder entender a posteriori los resultados y concluir si son válidos.

Esta situación de partida solo será explicada en este caso, ya que se hacía necesaria la definición de los símbolos, pero a partir de aquí se considera reiterativo ya que se presenta bajo las distintas estrategias.

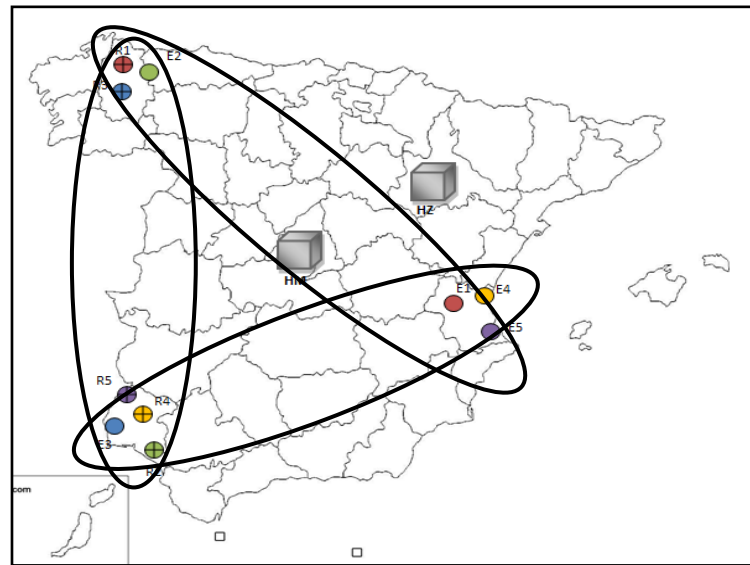
Estrategia directa pura

Figura 7.2. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Directa pura

Para que dos o más envíos se unan en una ruta, es necesario que cumplan las condiciones mostradas en el apartado 4.2 *Agrupación de rutas* de la memoria.

En el caso de seguir una estrategia de envío directa pura, por la restricción 2, solo podrían unirse las órdenes 4 y 5. Si la diferencia entre las ventanas temporales es amplia pero no se permite espera, no se une ningún envío ya que todos llegarán antes de su ventana de entrega. Si se unieran, la espera sería mayor para la orden que se entregara en segundo lugar. Los resultados se pueden observar en la tabla 7.5.

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.5. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si está permitida la espera, los envíos 4 y 5 se unen en una misma ruta debido al gran margen que hay entre las recogidas y las entregas, según aparece en la tabla 7.2. Esta ruta comienza en el nodo de recogida 5, *Palos_Frontera* y continúa por el nodo de recogida 4, *Tartessos*. La entrega se produce en orden inverso (política LIFO), primero descarga en el nodo de entrega 4, *Cova*, y por último

en el nodo de entrega 5, *Vereda*. Se observa que al disminuir el número de rutas, el coste total disminuye.

Carga total: 40			Coste total: 2705.03			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
2	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	9	720.93

Tabla 7.6. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas temporales es estrecha, lo más probable es que sólo haya tiempo de descargar la mercancía dentro de la ventana de entrega en una sola orden. En cualquier caso, si hubiera holgura suficiente se produciría la agrupación de órdenes en una misma ruta tanto si hay espera como si no. En este caso, no hay holgura suficiente, así que no se produce ninguna agrupación de rutas tanto si se permite espera como si no se permite.

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.7. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.8. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. ajustada

Por último, en las últimas combinaciones la diferencia entre ventanas es mixta. Como se ha comentado, solo las órdenes 4 y 5 cumplen la condición 2 mostrada en la memoria. En este caso, la orden 4 tiene una diferencia entre ventanas amplia mientras que la 5 estrecha. Si no se permite espera, ocurrirá lo mismo que para los casos anteriores sin espera. No dará tiempo a realizar todo el recorrido para el caso de la orden 5.

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.9. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Sin embargo, en caso de que sí que se permita espera, este problema no ocurrirá, así que se producirá una agrupación de estas dos órdenes en una misma ruta, disminuyendo así el coste global.

Carga total: 40			Coste total: 2705.03			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
2	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	9	720.93

Tabla 7.10. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke modificada

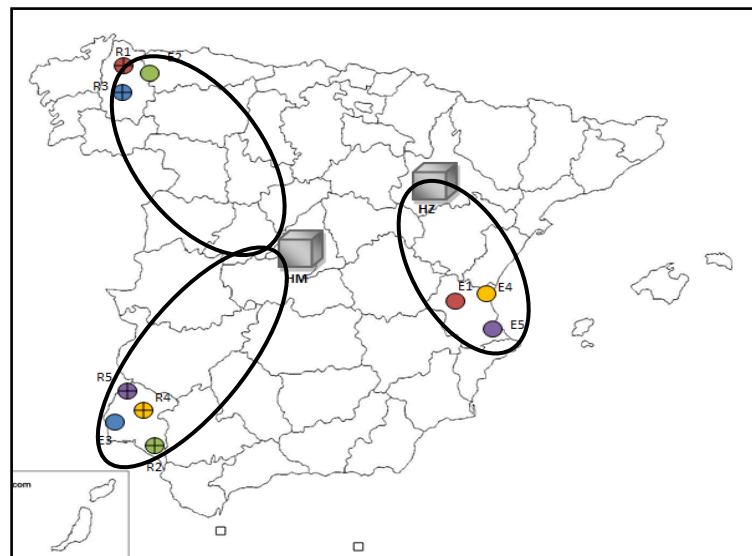


Figura 7.3. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. H&S modif.

En este caso, inicialmente se le asignan a todas las rutas una estrategia de Hub&Spoke. En este caso, según la configuración de las elipses y si las restricciones temporales lo permiten, se podrá realizar las siguientes agrupaciones:

- Nodos de recogida 1 y 3 con el hub de Alcobendas
- Nodos de recogida 2, 4 y 5 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 1, 4 y 5 con el hub de Zaragoza
- Nodos de recogida 1, 4 y 5 con el hub de Alcobendas junto con los nodos de entrega respectivos 1, 4 y 5 con el hub de Zaragoza

Si la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega es amplia, el tiempo para pasar incluso por los dos *hubs* es suficiente. La agrupación es alta ya que el momento de salida del *hub* se calcula en función del fin de la ventana temporal en el nodo de entrega. En las tablas 7.11 y 7.12 se muestra el resultado de esta agrupación. La solución es la misma independiente de si se permite espera o no. En la ruta *Palos_Frontera – Hub Alcobendas* se agrupan las órdenes 2, 4 y 5 y en la *Vilalba – Hub Alcobendas* las órdenes 1 y 3. Desde el Hub Alcobendas parten las órdenes 2 y 3 hacia *Begonte* y *Dominicano* respectivamente en rutas independientes. Las órdenes 1, 4 y 5 realizan el recorrido entre los dos *hubs* y por último, en una misma ruta, parten desde el *Hub Plaza* hacia sus respectivos nodos de entrega, finalizando con la orden 1 en *Fuentejarro*.

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.11. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.12. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. amplia

En el caso de que la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega sea estrecha y no se permita espera, todas las órdenes pasan a envíos directos para llegar al destino dentro de la ventana de entrega. La agrupación es nula por el mismo motivo.

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.13. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. ajustada

Si se permite espera, las restricciones se relajan y las rutas 1 y 5 siguen una estrategia de Hub&Spoke y se pueden agrupar en el trayecto entre el *hub* y el destino.

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	CC_Lugo	HUB PLAZA	Lugo	Zaragoza	13	523.95
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	20	240.17

Tabla 7.14. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. ajustada

Para una diferencia entre ventanas mixta, depende de las asignaciones que se han realizado de forma aleatoria a cada orden. En este caso, la solución es igual si se permite espera o no. Las órdenes 1 y 4 se mantienen con una estrategia Hub&Spoke mientras que las demás pasan a estrategia directa pura. Las rutas 1 y 4 se agrupan en los trayectos entre *hubs* y en el trayecto entre *Hub Plaza* y destinos.

Carga total: 40			Coste total: 3201.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	546.01
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.16
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.15. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3201.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	546.01
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.16
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.16. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. mixta

Estrategia heurística

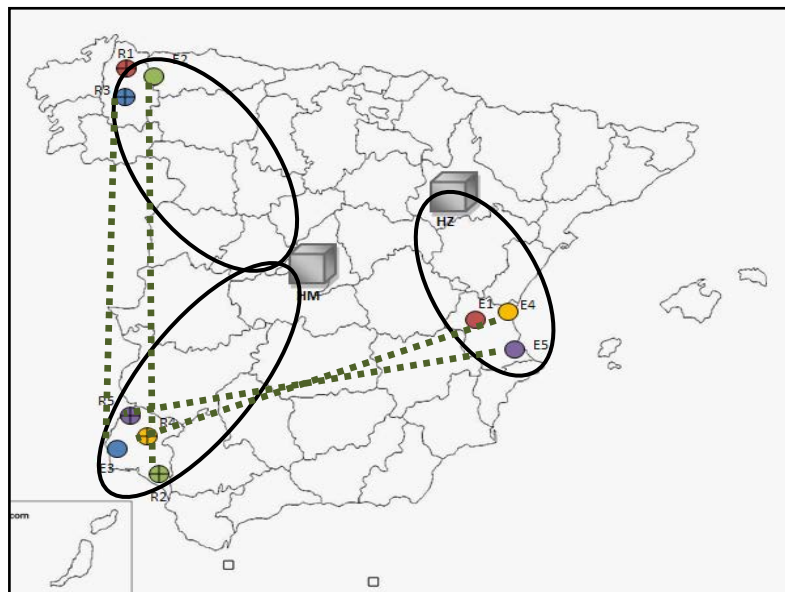


Figura 7.4. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Heurística

Las órdenes cuyos nodos de recogida y de entrega están unidos por las líneas punteadas, satisfacen la condición explicada en el punto 4.3 *Metodología* de la memoria. Sin embargo, la distancia entre ellos es muy grande, así que inicialmente de le asignará la estrategia de Hub&Spoke. Así pues, en este caso la estrategia de heurística funcionará de la misma forma que se ha explicado en la estrategia Hub&Spoke modificada, obteniendo los mismos resultados.

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.17. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.18. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 3256.82			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	Fuentejarro	Lugo	Valencia	13	710.11
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63

Tabla 7.19. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3261.83			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Tartessos	Cova	Huelva	Valencia	2	607.09
1	CC_Lugo	HUB PLAZA	Lugo	Zaragoza	13	523.95
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	20	240.17

Tabla 7.20. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3201.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	546.01
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.16
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.21. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3201.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	Vereda	Huelva	Valencia	7	665.63
1	Vilalba	Dominicano	Lugo	Huelva	3	671.03
1	Parque_Natural	Begonte	Huelva	Lugo	15	602.96
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	546.01
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.16
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.22. 5 órd. 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke pura

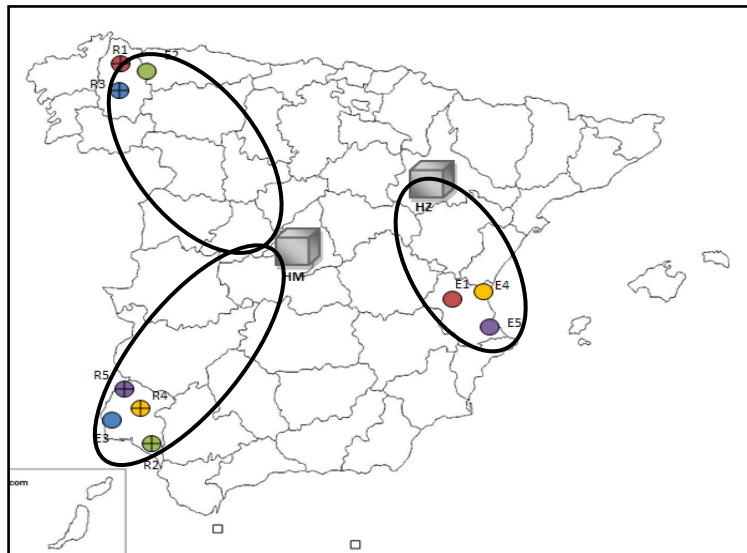


Figura 7.5. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. H&S pura

En esta estrategia se obliga a pasar a todas las órdenes por lo menos por un *hub*. La asignación se realiza adjudicando el *hub* más cercano a cada operación. Como en el caso de Hub&Spoke modificada, si cumplen las condiciones temporales, se podrá agrupar las siguientes órdenes:

- Nodos de recogida 1 y 3 con el hub de Madrid
- Nodos de recogida 2, 4 y 5 con el hub de Madrid
- Nodos de entrega 1, 4 y 5 con el hub de Zaragoza
- Nodos de recogida 1, 4 y 5 con el hub de Madrid junto con los nodos de entrega respectivos 1, 4 y 5 con el hub de Zaragoza

El comportamiento es el mismo que en los casos anteriores si la diferencia entre las ventanas es amplia, como se muestra en los resultados obtenidos para estas condiciones, que aparecen en las tablas 7.23 y 7.24.

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.23. 5 ord. 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2375.39			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	22	244.49
3	Palos_Frontera	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	24	602.29
2	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	16	460.77
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
3	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	22	168.88

Tabla 7.24. 5 ord. 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. amplia

En el caso de que la diferencia entre las ventanas temporales sea pequeña y no se permita espera, solo se asigna un *hub* a cada orden y no se agruparán ya que no habrá tiempo suficiente de entrega dentro de las ventanas temporales. Así, habrá 10 rutas, 5 entre los nodos de origen y el *hub* asignado y 5 entre el *hub* asignado y el origen, como se muestra en la tabla 7.25. Si se permite espera, las condiciones se relajan y en este caso, se permite la agrupación de las órdenes 1 y 5 en el trayecto entre el *hub* y el destino, como se observa en la tabla 7.26.

Carga total: 40			Coste total: 4043.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	HUB PLAZA	Lugo	Zaragoza	13	523.95
1	Tartessos	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	2	609.25
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
1	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	13	208.69
1	HUB PLAZA	Cova	Zaragoza	Valencia	2	208.25
1	HUB PLAZA	Vereda	Zaragoza	Valencia	7	137.44
1	Parque_Natural	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	387.33
1	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	453.46
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49

Tabla 7.25. 5 ord. 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3937.98			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC_Lugo	HUB PLAZA	Lugo	Zaragoza	13	523.95
1	Tartessos	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	2	609.25
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	20	240.17
1	HUB PLAZA	Cova	Zaragoza	Valencia	2	208.25
1	Parque_Natural	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	387.33
1	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	453.46
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	15	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49

Tabla 7.26. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. ajustada

Si la diferencia entre las ventanas es mixta, depende de la asignación realizada a cada orden. En este caso solo se produce la agrupación en las órdenes 1 y 4 en los trayectos entre los dos *hubs* y entre el *Hub Plaza* y los destinos. En los trayectos entre los orígenes y los *hubs* no se produce ninguna agrupación. Tanto si se permite espera como si no, el resultado es el mismo, según se muestra en las tablas 7.27 y 7.28.

Carga total: 40			Coste total: 3756.10			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	HUB PLAZA	Vereda	Zaragoza	Valencia	7	137.44
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	456.01
1	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	453.46
1	Parque_Natural	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	387.33
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.85
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	545.48
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Valencia	15	444.47
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.27. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3756.10			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Palos_Frontera	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	7	616.63
2	HUB PLAZA	Fuentejarro	Zaragoza	Valencia	15	211.23
1	HUB PLAZA	Vereda	Zaragoza	Valencia	7	137.44
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	2	456.01
1	Vilalba	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	453.46
1	Parque_Natural	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	387.33
1	CC_Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	426.85
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	545.48
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Valencia	15	444.47
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	15	168.88

Tabla 7.28. 5 órd. 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. mixta

7.2.2 Caso 2

En el segundo caso de simulación de 5 órdenes de envío para nodos concentrados en 3 provincias, éstos se sitúan según aparecen en las tablas 7.29, 7.30 y 7.31.

Como se ha comentado, en todos los casos la ventana de recogida se sitúa entre 840 y 1140 minutos o, lo que es lo mismo, entre las 14:00 y las 19:00.

En el caso de que la diferencia entre las ventanas sea amplia, tabla 7.29, la operación de entrega se realizará entre los 1860 minutos y los 2160 minutos, es decir, entre las 7:00 y las 12:00 del día siguiente a la recogida. Las ventanas temporales en el caso de que la diferencia entre ellas sea amplia es la misma siempre, independiente de la situación de los nodos.

Sin embargo, en la tabla 7.30 la diferencia entre la recogida y la entrega es ajustada. La ventana de entrega se calcula sumando el tiempo necesario para llegar al destino. La ventana de recogida será igual que en el caso anterior mientras que la ventana de entrega es función de la distancia a la que se encuentran los nodos de origen y destino.

En la última tabla, tabla 7.31, se asigna aleatoriamente uno de los dos casos anteriores a cada orden de envío. En este caso, se ha asignado a las órdenes 1, 4 y 5 una diferencia entre las ventanas amplia. En las órdenes 2 y 3, la diferencia entre las ventanas es ajustada.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	840	1140	1860	2160	5
2	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	840	1140	1860	2160	2
3	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	8
4	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	840	1140	1860	2160	12
5	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	840	1140	1860	2160	13

Tabla 7.29 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	840	1140	1374	1674	5
2	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	840	1140	1363	1663	2
3	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	840	1140	1388	1688	8
4	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	840	1140	1499	1799	12
5	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	840	1140	1401	1701	13

Tabla 7.30 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	840	1140	1860	2160	5
2	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	840	1140	1363	1663	2
3	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	840	1140	1388	1688	8
4	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	840	1140	1860	2160	12
5	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	840	1140	1860	2160	13

Tabla 7.31 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana mixta

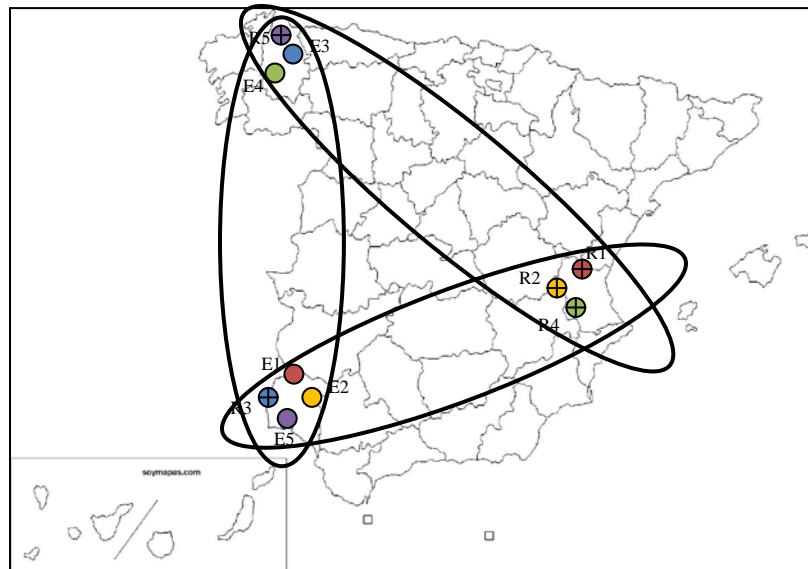
Estrategia directa pura

Figura 7.6. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Directa pura

Para que dos o más envíos se unan en una ruta, es necesario que cumplan las condiciones mostradas en el apartado 4.2 *Agrupación de rutas* de la memoria.

En el caso de seguir una estrategia de envío directa pura, por la restricción 2, solo podrían unirse las órdenes 1 y 2, ya que ambas tienen su origen en la provincia de Valencia y su destino en la provincia de Huelva. Si la diferencia entre las ventanas temporales es amplia pero no se permite espera, no se une ningún envío ya que todos llegarán antes de su ventana de entrega. Si se unieran, la espera sería mayor para la orden que se entregara en segundo lugar. Los resultados se pueden observar en la tabla 7.32.

Carga total: 40			Coste total: 3299.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	5	623.89
1	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.32. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si está permitida la espera, los envíos 1 y 2 se unen en una misma ruta debido al gran margen que hay entre las recogidas y las entregas, según aparece en la tabla 7.33. La primera ruta agrupa los envíos 1 y 2. Se observa que al disminuir el número de rutas, el coste total disminuye.

Carga total: 40			Coste total: 2694.21			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	7	629.66
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.33. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas temporales es estrecha, la agrupación es difícil que se produzca, pero en este caso, al encontrarse tan cerca los nodos 1 y 2 tienen holgura suficiente para juntarse en una misma orden. Como se comenta en el análisis previo de la agrupación esperada de rutas en la memoria, ocurre lo mismo tanto si se permite espera como si no, como aparecen en las tablas 7.34 y 7.35.

Carga total: 40			Coste total: 2707.10			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	7	642.53
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.34. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 2707.10			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	7	642.53
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.35. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. ajustada

Por último, en las últimas combinaciones la diferencia entre ventanas es mixta. Como se puede observar en la tabla 7.36, se ha asignado a la orden 1 una diferencia de ventana amplia y a la orden 2 una diferencia estrecha. Solo estas dos órdenes cumplen la condición 2 mostrada en la memoria para agruparse. Si no se permite espera, ocurrirá lo mismo que para los casos anteriores sin espera. No dará tiempo a realizar todo el recorrido para el caso de la orden 5.

Carga total: 40			Coste total: 3299.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Alboraya	Colmenillas	Valencia	Huelva	5	623.89
1	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.36. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Sin embargo, en caso de que sí que se permita espera, este problema no ocurrirá, así que se producirá una agrupación de estas dos órdenes en una misma ruta, disminuyendo así el coste global.

Carga total: 40			Coste total: 2707.10			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Godofredo	El Tejas	Valencia	Huelva	7	642.53
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76

Tabla 7.37. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke modificada

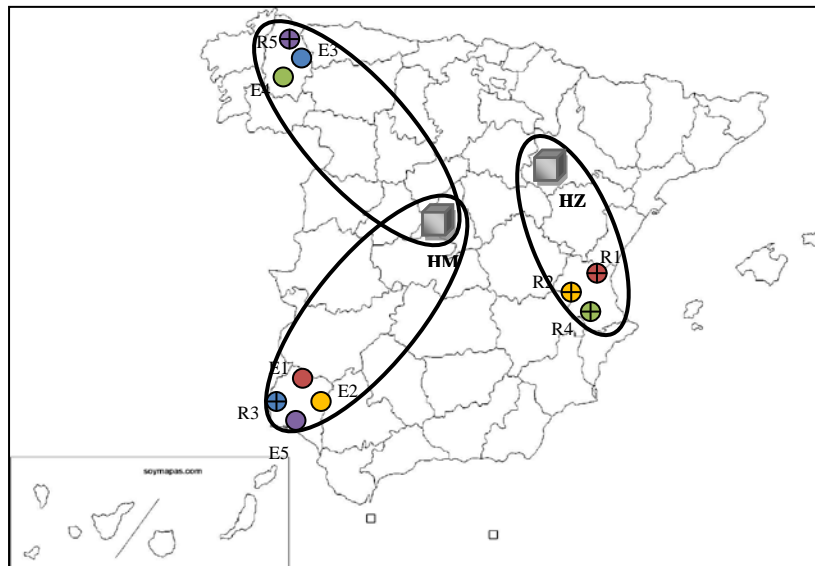


Figura 7.7. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. H&S modif.

En este caso, inicialmente se le asignan a todas las rutas una estrategia de Hub&Spoke. Según la configuración de las elipses y si las restricciones temporales lo permiten, se podrá realizar las siguientes agrupaciones:

- Nodos de recogida 1, 2 y 4 con el hub de Plaza
- Nodos de entrega 1 y 2 y 5 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 3 y 4 con el hub de Alcobendas

Si la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega es amplia, el tiempo para pasar incluso por los dos *hubs* es suficiente. La agrupación es alta ya que el momento de salida del *hub* se calcula en función del fin de la ventana temporal en el

nodo de entrega. En las tablas 7.38 y 7.39 se muestra el resultado de esta agrupación. La solución es la misma independiente de si se permite espera o no. En la primera ruta se agrupan las recogidas de las órdenes 1, 2 y 4 en el trayecto entre la provincia de origen, Valencia, y el Hub Plaza y en el trayecto entre el Hub Plaza y el Hub Alcobendas, mientras que las recogidas de las órdenes 3 y 5 se realizan en rutas independientes. En las entregas, se agrupan las órdenes 3 y 4 en la ruta 4 y las órdenes 1, 2 y 5 en la ruta 5.

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.38. 5 ord. 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.39. 5 ord. 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. amplia

En el caso de que la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega sea estrecha, se tiene holgura suficiente para agrupar el trayecto entre el Hub Alcobendas y en destino de las órdenes 1 y 2. El resto de órdenes se convierten en directas. Se obtiene el mismo resultando tanto si se permite espera como si no se permite.

Carga total: 40			Coste total: 3129.40			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
2	HUB ALCOBENDAS	Colmenillas	Madrid	Huelva	7	455.78

Tabla 7.40. 5 ord. 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3129.40			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
2	HUB ALCOBENDAS	Colmenillas	Madrid	Huelva	7	455.78

Tabla 7.41. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. ajustada

Para una diferencia entre ventanas mixta, depende de las asignaciones que se han realizado de forma aleatoria a cada orden. En este caso, la solución es igual si se permite espera o no. Las órdenes 2, 3 y 4 no se pueden agrupar con ninguna otra por limitaciones temporales o por lejanía entre sí, así que pasan a una estrategia directa. Por el contrario, las rutas 1 y 5 se agrupan en el trayecto entre el Hub de Madrid y el destino en la provincia de Huelva. La orden 1 realiza paradas en ambos *hubs*.

Carga total: 40			Coste total: 3315.61			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Godofredo	El Tejar	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.81
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.62
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.42. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3315.61			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Godofredo	El Tejar	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.81
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.62
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.43. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. mixta

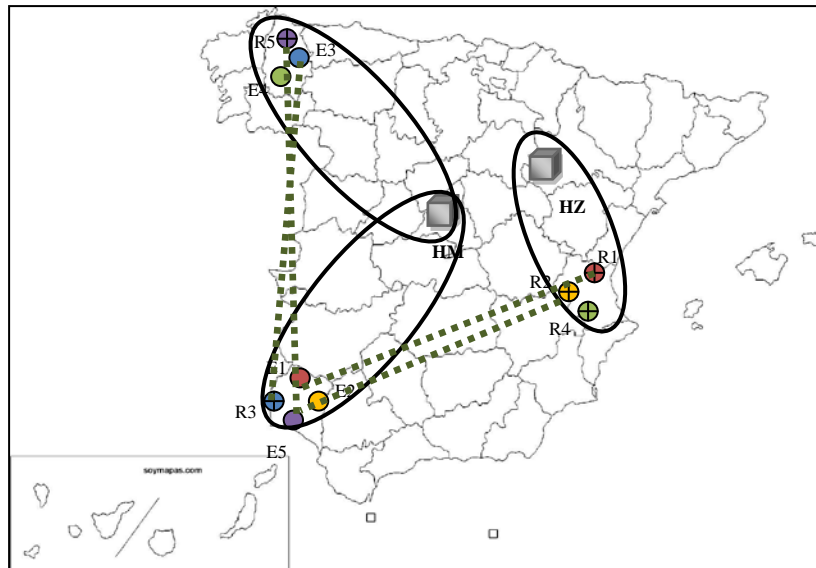
Estrategia heurística

Figura 7.8. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Heurística

Las órdenes cuyos nodos de recogida y de entrega están unidos por las líneas punteadas, satisfacen la condición explicada en el punto 4.3 *Metodología* de la memoria. Sin embargo, al encontrarse los nodos en provincias muy alejadas, la distancia entre ellos es muy grande, así que inicialmente se les asignará la estrategia de Hub&Spoke. Así pues, en este caso la estrategia de heurística funcionará de la misma forma que se ha explicado en la estrategia Hub&Spoke modificada, obteniendo los mismos resultados. Esto es más difícil que ocurra en los casos en que los nodos se encuentren distribuidos en 21 provincias.

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.44. 5 ord. 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.45. 5 ord. 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 3129.40			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
2	HUB ALCOBENDAS	Colmenillas	Madrid	Huelva	7	455.78

Tabla 7.46. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3129.40			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Begonte	Tartessos	Lugo	Huelva	13	654.76
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
2	HUB ALCOBENDAS	Colmenillas	Madrid	Huelva	7	455.78

Tabla 7.47. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3315.61			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Godofredo	El Tejar	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.81
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.62
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.48. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3315.61			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Tartessos	Termas Lugo	Huelva	Lugo	8	640.27
1	Benito	CEAO	Valencia	Lugo	12	769.53
1	Godofredo	El Tejar	Valencia	Huelva	2	611.02
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.81
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.62
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.49. 5 órd. 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. mixta

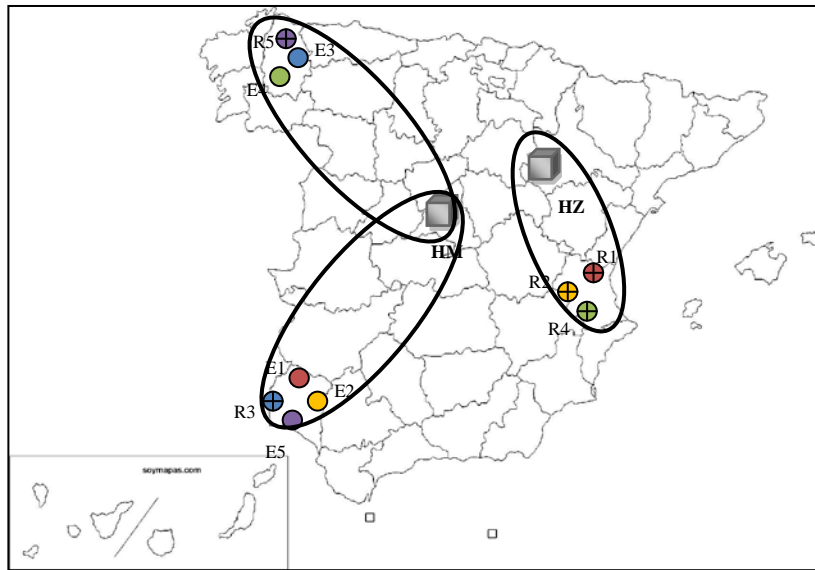
Estrategia Hub&Spoke pura

Figura 7.9. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. H&S pura

En esta estrategia se obliga a pasar a todas las órdenes por lo menos por un *hub*. La asignación se realiza adjudicando el *hub* más cercano a cada operación. Como en el caso de Hub&Spoke modificada, si cumplen las condiciones temporales, se podrá agrupar las siguientes órdenes:

- Nodos de recogida 1, 2 y 4 con el hub de Plaza
- Nodos de entrega 1 y 2 y 5 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 3 y 4 con el hub de Alcobendas

El comportamiento es el mismo que en los casos anteriores si la diferencia entre las ventanas es amplia, como se muestra en los resultados obtenidos para estas condiciones, que aparecen en las tablas 7.50 y 7.51.

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.50. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 40			Coste total: 2269.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
3	Benito	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	19	305.08
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	20	429.39
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64
3	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	19	168.88

Tabla 7.51. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. amplia

En el caso de que la diferencia entre las ventanas temporales sea pequeña y no se permita espera, sólo se asigna un *hub* a cada orden y sólo se agruparán las órdenes 1 y 2 en el trayecto desde el Hub de Madrid a los destinos. Así, habrá 9 rutas, 5 entre los nodos de origen y el *hub* asignado y 4 entre el *hub* asignado y el origen, como se muestra en la tabla 7.52. Si se permite espera, las condiciones se relajan y a la ruta agrupada se le une la orden 5, que también tiene el destino en la provincia de Huelva, quedando el resultado como muestra la tabla 7.53.

Carga total: 40			Coste total: 3623.26			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
1	Benito	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	12	345.30
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	HUB ALCOBENDAS	Termas Lugo	Madrid	Lugo	8	428.07
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	12	428.56
2	HUB ALCOBENDAS	Colmenillas	Madrid	Huelva	7	455.78
1	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	13	456.01

Tabla 7.52. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 40			Coste total: 3177.12			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
1	Benito	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	12	345.30
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
1	Alboraya	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	5	304.29
1	HUB ALCOBENDAS	Termas Lugo	Madrid	Lugo	8	428.07
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	12	428.56
3	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	20	465.64

Tabla 7.53. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. ajustada

Si la diferencia entre las ventanas es mixta, depende de la asignación realizada a cada orden. En este caso solo se produce la agrupación en las órdenes 1 y 5 en el trayecto entre el *hub* correspondiente y el destino. Esta agrupación se produce porque se ha asignado a ambas órdenes una diferencia de ventana grande y tienen su destino

en la misma provincia. Tanto si se permite espera como si no, el resultado es el mismo, según se muestra en las tablas 7.54 y 7.55.

Carga total: 40			Coste total: 3712.02			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
1	Benito	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	12	345.30
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.82
1	HUB ALCOBENDAS	El Tejar	Madrid	Huelva	2	454.52
1	HUB ALCOBENDAS	Termas Lugo	Madrid	Lugo	8	428.07
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	12	428.56
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.64
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.54. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 40			Coste total: 3712.02			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Begonte	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	13	444.47
1	Tartessos	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	8	456.01
1	Benito	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	12	345.30
1	Godofredo	HUB ALCOBENDAS	Valencia	Madrid	2	304.77
1	Alboraya	HUB PLAZA	Valencia	Zaragoza	5	215.82
1	HUB ALCOBENDAS	El Tejar	Madrid	Huelva	2	454.52
1	HUB ALCOBENDAS	Termas Lugo	Madrid	Lugo	8	428.07
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	12	428.56
2	HUB ALCOBENDAS	Tartessos	Madrid	Huelva	18	465.64
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	5	168.88

Tabla 7.55. 5 órd. 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. mixta

7.2.3 Caso 3

En las tablas 7.56, 7.57 y 7.58 aparecen las órdenes de envío generadas aleatoriamente para el tercer y último caso de 5 órdenes de envío con los nodos concentrados en tres provincias.

Como en todos los casos, la ventana de recogida se sitúan entre 840 y 1140 minutos o, lo que es lo mismo, entre las 14:00 y las 19:00.

En el caso de que la diferencia entre las ventanas sea amplia, tabla 7.56, la ventana de entrega es la misma que en los casos anteriores. E igualmente, cuando la diferencia entre la recogida y la entrega es ajustada, tabla 7.57, la ventana de entrega se calcula sumando el tiempo necesario para llegar al destino.

En la última tabla, tabla 7.58, se asigna aleatoriamente uno de los dos casos anteriores a cada orden de envío. En este caso, se ha asignado a las órdenes 2, 3 y 4 una diferencia entre las ventanas amplia. En las órdenes 1 y 5, la diferencia entre las ventanas es ajustada.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	4
2	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	6
3	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	5
4	Jara	Picassent	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	4
5	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	840	1140	1860	2160	3

Tabla 7.56 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	840	1140	1399	1699	4
2	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	840	1140	1383	1683	6
3	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	840	1140	1364	1664	5
4	Jara	Picassent	Huelva	Valencia	840	1140	1355	1655	4
5	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	840	1140	1385	1685	3

Tabla 7.57 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	840	1140	1399	1699	4
2	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	6
3	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	5
4	Jara	Picassent	Huelva	Valencia	840	1140	1860	2160	4
5	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	840	1140	1385	1685	3

Tabla 7.58 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana mixta

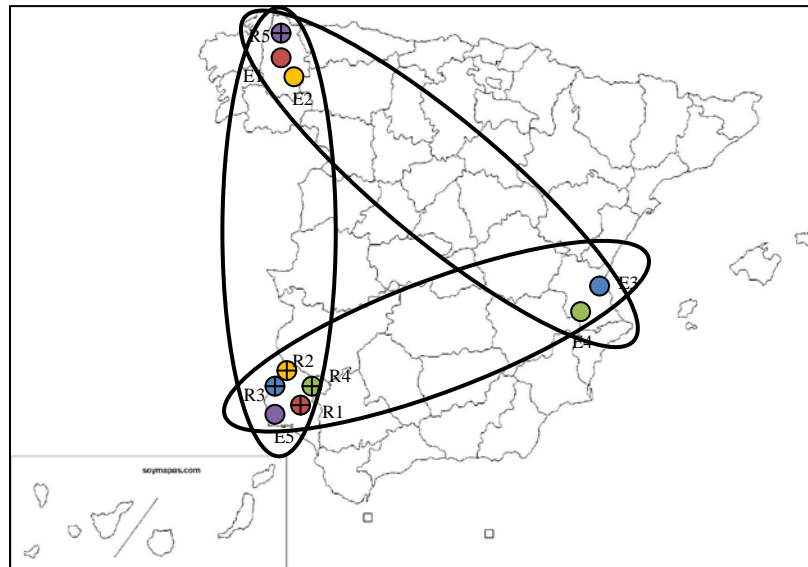
Estrategia directa pura

Figura 7.10. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Directa pura

Para que dos o más envíos se unan en una ruta, es necesario que cumplan las condiciones mostradas en el apartado 4.2 *Agrupación de rutas* de la memoria.

En el caso de seguir una estrategia de envío directa pura, por la restricción 2, podrían unirse las órdenes 1 y 2 en una ruta entre Huelva y Lugo y las órdenes 3 y 4 en una ruta entre Huelva y Valencia.

Si la diferencia entre las ventanas temporales es amplia pero no se permite espera, no se une ningún envío ya que todos llegarán antes de su ventana de entrega. Si se unieran, la espera sería mayor para la orden que se entregara en segundo lugar. Los resultados se pueden observar en la tabla 7.59.

Carga total: 22			Coste total: 3299.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	4	653.04
1	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	6	633.59
1	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	5	612.386
1	Jara	Picassent	Huelva	Valencia	4	601.18
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.59. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si está permitida la espera, los envíos que cumplen con la restricción 2 se agrupan. Las rutas se reducen a 3 porque las órdenes 1 y 2 se agrupan en una misma ruta y las órdenes 3 y 4 en otra ruta. Se observa que al disminuir el número de rutas, el coste total disminuye. Tabla 7.60.

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.60. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. amplia

En este caso, aunque la diferencia entre las ventanas sea ajustada, existe una holgura suficiente para que las órdenes que cumplen la condición de proximidad sean agrupadas. El resultado es el mismo tanto si se permite espera como si no. En este caso, se vuelven a agrupar las órdenes 1 con la 2 y la 3 con la 4. Tablas 7.61 y 7.62.

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.61. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.62. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. ajustada

Por último, en las últimas combinaciones la diferencia entre ventanas es mixta. Como se puede observar en la tabla 7.63, se le ha asignado una ventana amplia a las órdenes 2, 3 y 4. Como ocurría para el caso de diferencia entre ventanas amplia, si no se permite espera, no se producirá agrupación porque ello conllevaría una mayor espera. Así, el resultado es que todas las órdenes formarán una ruta por sí solas, como se puede observar en la tabla 7.63.

Carga total: 22			Coste total: 3299.48			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	4	653.04
1	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	6	633.59
1	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	5	612.386
1	Jara	Picassent	Huelva	Valencia	4	601.18
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.63. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Sin embargo, en caso de que sí que se permita espera, este problema no ocurrirá, así que se producirán las agrupaciones de las órdenes que cumplen las restricciones espaciales de proximidad de nodos.

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.64. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke modificada

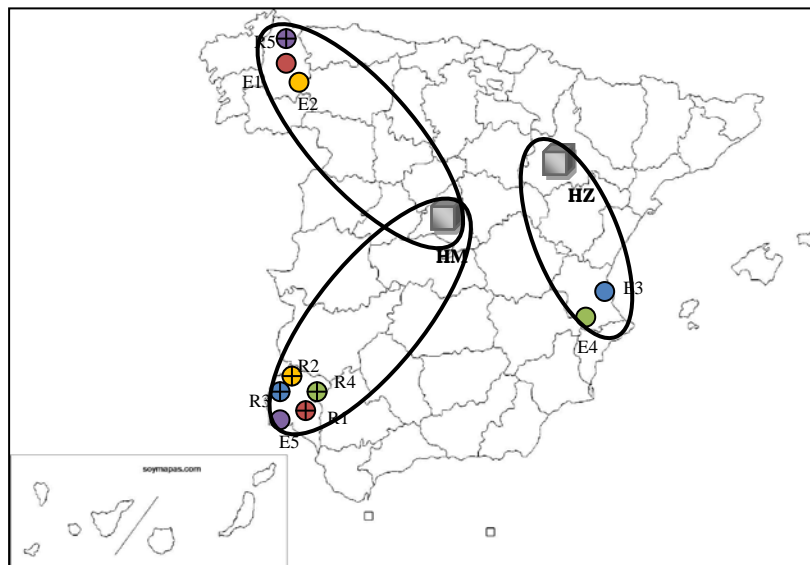


Figura 7.11. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. H&S modif

En este caso, inicialmente se le asignan a todas las rutas una estrategia de Hub&Spoke. Según la configuración de las elipses y si las restricciones temporales lo permiten, se podrá realizar las siguientes agrupaciones:

- Nodos de recogida 1, 2, 3 y 4 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 1 y 2 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 3 y 4 con el hub de Plaza

Si la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega es amplia, el tiempo para pasar incluso por los dos *hubs* es suficiente. La agrupación es alta ya que el momento de salida del *hub* se calcula en función del fin de la ventana temporal en el nodo de entrega. En el caso de que no se permita espera, las recogidas de las órdenes 1, 2, 3 y 4 se realizan en la misma ruta comenzando por la orden 4, nodo *Jara* y terminando en el *hub de Alcobendas*. Desde ahí, las órdenes 1 y 2 se agrupan en

una ruta hacia la provincia de Lugo. Esta ruta aparece en cuarto lugar en la tabla 7.65. Por otro lado, las órdenes 3 y 4 se agrupan en otra ruta que tras pasar por el hub de Plaza se dirige hacia la provincia de Valencia, como aparecen en las rutas 2 y 5 de la tabla. La orden 5 no se une con ninguna otra en ningún trayecto, así que pasa a ser una ruta directa.

Carga total: 22			Coste total: 1984.36			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	514.86
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.65. 5 ord. 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. amplia

En el caso de que esté permitida la espera, las agrupaciones de órdenes son iguales, pero el orden de paso por los nodos es distinto. Así, el coste total desciende. Como se puede observar en la tabla 7.66, la ruta 3, que agrupa las órdenes 1, 2, 3 y 4, comienza en el nodo de la ruta 1, *Lepe*. Como se sigue una política *LIFO*, el orden de descarga también cambia, así que en la ruta de entrega que aparece en cuarto lugar en la tabla, descarga en último lugar en el nodo de la orden 2, *CEAO*, a diferencia del caso anterior.

Carga total: 22			Coste total: 1974.36			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	494.68
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	10	449.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.66. 5 ord. 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. amplia

Cuando la diferencia entre las ventanas de recogida y entrega es estrecha, en ninguna orden da tiempo a pasar por algún *hub* y juntarse con otra orden. Así, por la metodología seguida en esta estrategia, todas las órdenes pasan a ser directas y se comportan como se ha explicado para la estrategia directa.

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.67. 5 ord. 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.68. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. ajustada

Para una diferencia entre ventanas mixta, depende de las asignaciones que se han realizado de forma aleatoria a cada orden. La orden 5 no se agrupa en ningún caso por la lejanía de sus nodos con las demás órdenes. En el caso de que no se permita espera, como la orden 1 tiene una diferencia entre ventanas ajustada, no se puede agrupar con la orden 2, resultando ambas órdenes directas. Las órdenes 3 y 4, como tienen una diferencia de ventanas amplia, se agrupan en los trayectos entre el origen y el hub de Alcobendas, en el trayecto entre ambos hubs y en el trayecto ente el hub de Plaza y los destinos.

Carga total: 22			Coste total: 2785.98			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	4	653.04
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
1	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	6	633.60
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
2	Colmenillas	HUB ACOBENDAS	Huelva	Madrid	9	468.93
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.69. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. mixta

En el caso de que se permita espera, las órdenes 1 y 2 se podrán agrupar en la misma ruta, como aparece en la tabla 7.70 Además, el comienzo de la ruta que agrupa las órdenes 3 y 4 se cambia, con lo que se consigue una disminución del coste.

Carga total: 22			Coste total: 2169.32			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
2	Jara	HUB ACOBENDAS	Huelva	Madrid	9	470.30
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.70. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. mixta

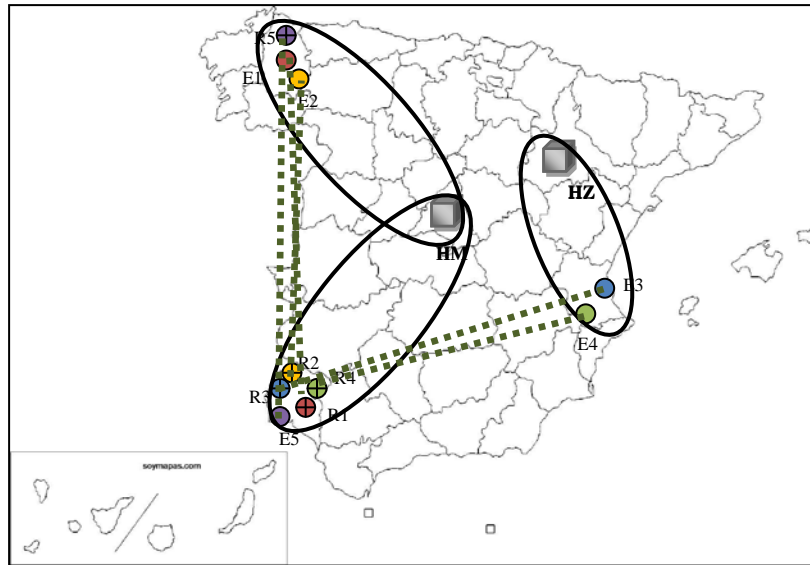
Estrategia heurística

Figura 7.12. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Heurística

Todas las órdenes que se han generado en este caso, cumplen la condición explicada en el punto 4.3 *Metodología* de la memoria. Sin embargo, al encontrarse los nodos en provincias muy alejadas, la distancia entre ellos es muy grande, así que inicialmente se les asignará la estrategia de Hub&Spoke. Esto ocurre en los tres casos donde los nodos se encuentran concentrados en 3 provincias alejadas. Así pues, en este caso la estrategia de heurística funcionará de la misma forma que se ha explicado en la estrategia Hub&Spoke modificada, obteniendo los mismos resultados.

Carga total: 22			Coste total: 1984.36			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	514.86
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.71. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 22			Coste total: 1974.36			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	494.68
2	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	10	449.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.72. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. amplia

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.73. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 22			Coste total: 1935.95			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
2	Colmenillas	Aeropuerto Valencia	Huelva	Valencia	9	631.07
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30

Tabla 7.74. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. ajustada

Carga total: 22			Coste total: 2785.98			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	4	653.04
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
1	El Tejar	CEAO	Huelva	Lugo	6	633.60
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
2	Colmenillas	HUB ACOBENDAS	Huelva	Madrid	9	468.93
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.75. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 22			Coste total: 2169.32			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	Lepe	Robade	Huelva	Lugo	10	668.60
1	CC Lugo	Exfasa	Lugo	Huelva	3	636.30
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
2	Jara	HUB ACOBENDAS	Huelva	Madrid	9	470.30
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.76. 5 órd. 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke pura

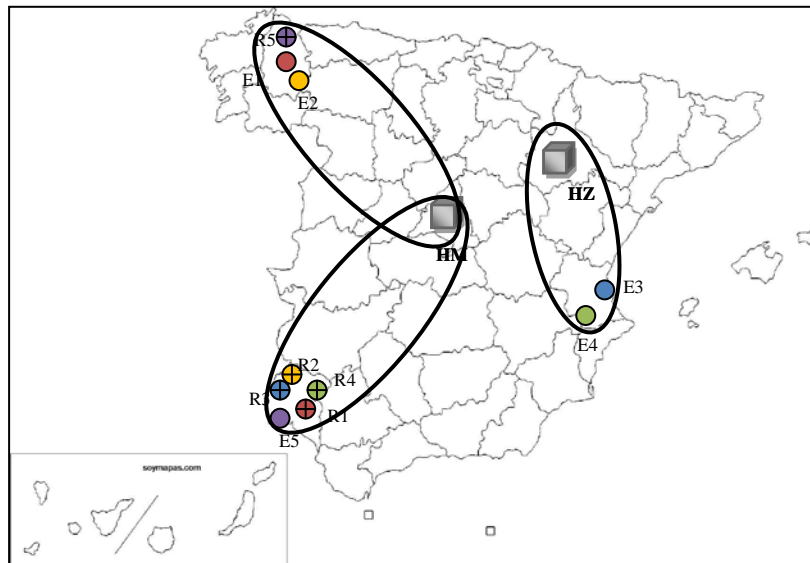


Figura 7.13. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. H&S pura

En esta estrategia se obliga a pasar a todas las órdenes por lo menos por un *hub*. La asignación se realiza adjudicando el *hub* más cercano a cada operación. Como en el caso de Hub&Spoke modificada, si cumplen las condiciones temporales, se podrá agrupar las siguientes órdenes:

- Nodos de recogida 1, 2, 3 y 4 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 1 y 2 con el hub de Alcobendas
- Nodos de entrega 3 y 4 con el hub de Plaza

A la orden 5, que se puede agrupar a ninguna otra, se le asigna el hub de Alcobendas y constituye dos rutas, del origen al *hub* y del *hub* al destino. El resto de órdenes, en el caso de diferencia de ventana amplia, se comporta de la misma forma que en los casos anteriores de Hub&Spoke modificada y heurística.

Carga total: 22			Coste total: 2206.65			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	CC Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	426.16
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	494.68
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.77. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 22			Coste total: 2206.65			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
4	CC Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	426.16
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	19	494.68
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88

Tabla 7.78. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia

En el caso de que la diferencia entre las ventanas temporales sea pequeña y no se permita espera, se le asigna un solo *hub* a cada orden. El resultado, que aparecen en las tablas 7.79 y 7.80, muestra que si no se permite espera, no existe holgura suficiente como para realizar agrupaciones en ningún trayecto. Sin embargo, al permitir espera, las restricciones disminuyen y se produce la agrupación de las órdenes 1 con la 2 y 3 con la 4 en el trayecto entre el *hub* y el destino. El coste así se ve sensiblemente reducido.

Carga total: 22			Coste total: 4329.09			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	4	477.17
1	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	4	438.83
1	El Tejar	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	6	454.52
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	6	428.56
1	Colmenillas	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	5	610.30
1	HUB PLAZA	Aeropuerto Valencia	Zaragoza	Valencia	5	209.88
1	Jara	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	4	607.00
1	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	4	224.15
1	CC Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	426.16
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62

Tabla 7.79. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 22			Coste total: 3692.08			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	4	477.17
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
1	El Tejar	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	6	454.52
1	Colmenillas	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	5	610.30
1	Jara	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	4	607.00
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23
1	CC Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	426.16
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62

Tabla 7.80. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. ajustada

En el caso de que las órdenes 2, 3 y 4 tengan una diferencia entre ventanas amplia y las 1 y 5 estrecha, se produce una agrupación de las órdenes 2, 3 y 4 desde el origen hasta el Hub de Alcobendas asignado. De ahí, las órdenes 3 y 4 siguen agrupadas hasta llegar a origen, pasando por el Hub de Plaza. Las órdenes 1 y 5, que son las que tienen un margen estrecho, no se agrupan con ninguna otra orden. Los resultados se muestran en la tabla 7.81. Además, en el caso de que se permita espera, las órdenes 1 y 2 se agrupan en el recorrido entre el Hub de Alcobendas y los destinos, como se observa en la tabla 7.82.

Carga total: 22			Coste total: 3089.09			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	4	477.17
1	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	4	438.83
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	471.74
1	CC Lugo	HUB ALCOBENDAS	Lugo	Madrid	3	426.16
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	6	428.56
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23

Tabla 7.81. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 22			Coste total: 3089.09			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Lepe	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	4	477.17
2	HUB ALCOBENDAS	Robade	Madrid	Lugo	10	439.08
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	15	471.74
1	HUB ALCOBENDAS	Exfasa	Madrid	Huelva	3	452.62
1	HUB ALCOBENDAS	CEAO	Madrid	Lugo	6	428.56
2	HUB ALCOBENDAS	HUB PLAZA	Madrid	Zaragoza	9	168.88
2	HUB PLAZA	Picassent	Zaragoza	Valencia	9	225.23

Tabla 7.82. 5 órd. 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta

7.3 5 órdenes de envío y 21 provincias

7.3.1 Caso 1

En la generación aleatoria de nodos se han obtenido los mostrados en las tablas 7.83, 7.84 y 7.85. En este caso, tanto los nodos de recogida como los de entrega pueden estar repartidos en 21 provincias peninsulares españolas, según se comenta en la memoria.

La sistemática de las ventanas temporales es la misma que en casos anteriores. Como muestran la tabla 7.85, en el caso de una diferencia entre ventanas mixtas, se ha asignado a las órdenes 1, 2 y 3 una diferencia de ventanas estrecha, mientras que a las órdenes 4 y 5 una diferencia amplia. En las páginas siguientes se analiza este caso.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Itucci	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1860	2160	1
2	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	840	1140	1860	2160	5
3	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	840	1140	1860	2160	2
4	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	840	1140	1860	2160	1
5	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	840	1140	1860	2160	10

Tabla 7.83 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Itucci	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1398	1698	1
2	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	840	1140	1213	1513	5
3	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	840	1140	1378	1678	2
4	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	840	1140	1417	1717	1
5	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	840	1140	1390	1690	10

Tabla 7.84 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Itucci	Begonte	Huelva	Lugo	840	1140	1398	1698	1
2	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	840	1140	1213	1513	5
3	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	840	1140	1378	1678	2
4	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	840	1140	1860	2160	1
5	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	840	1140	1860	2160	10

Tabla 7.85 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana mixta

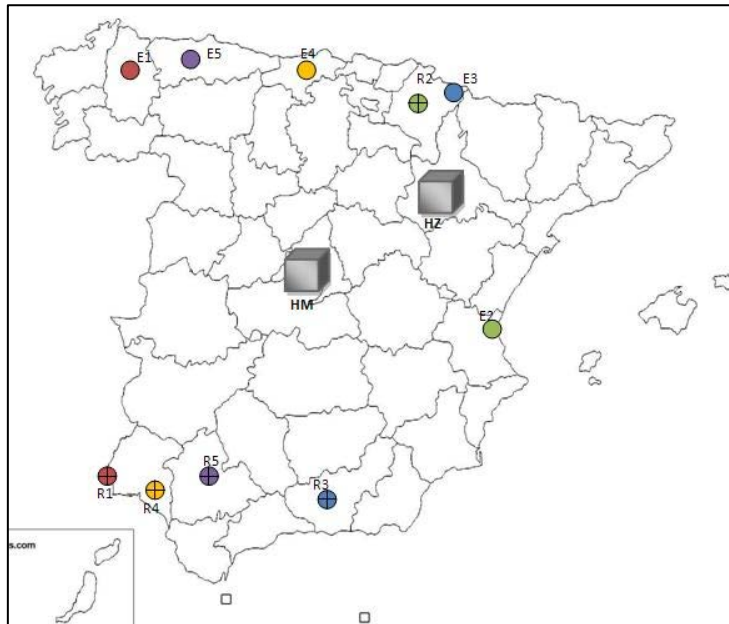
Estrategia directa pura

Figura 7.14. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Directa pura

Para esta estrategia, en este caso, solo se permitiría la agrupación de las órdenes 1 y 5, cuando cumplan las restricciones temporales. En el caso de que la diferencia entre las ventanas de recogida y de entrega sea amplia y no se permita espera, no se producirá agrupación ya que si se unen, se produciría mayor espera antes de su ventana de entrega. Los resultados se pueden observar en la tabla 7.86.

Carga total: 19			Coste total: 3031.25			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Itucci	Begonte	Huelva	Lugo	1	651.06
1	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	10	642.39

Tabla 7.86. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si se permite espera, las órdenes 1 y 5 se unen en una misma ruta que comienza en el nodo de la orden 1, *Itucci*, continúa con el nodo de la orden 5, *Cañada*, y descarga primero en el nodo de la orden 5, *Cangas Narcea* para acabar en el nodo de la orden 1, *Begonte*. Los resultados aparecen en la tabla 7.87.

Carga total: 19			Coste total: 2494.94			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Itucci	Begonte	Huelva	Lugo	11	757.14

Tabla 7.87. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. amplia

En las combinaciones 3 y 4, con una diferencia entre ventanas temporales ajustada, se produce la misma agrupación de rutas que en el caso anterior, como aparece en las tablas 7.88 y 7.89. En este caso, hay un margen temporal para que se produzca esta agrupación que es independiente de si se permite espera o no.

Carga total: 19			Coste total: 2494.94			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Itucci	Begonte	Huelva	Cantabria	11	757.14

Tabla 7.88. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.89. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. Ajustada

En los últimos casos se presenta la ventana mixta. Como se ha comentado, la orden 1 tiene una diferencia estrecha mientras que la orden 5 tiene una diferencia amplia. El resto de órdenes se sabe que no van a poder ser agrupadas. En el caso de que no se permita espera, ocurre como en el primer caso, que no se permitirá la agrupación, mientras que si se permite espera, se producirá agrupación de estas dos órdenes en una misma ruta.

Carga total: 19			Coste total: 3031.25			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Itucci	Begonte	Huelva	Luego	1	651.06
1	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	10	642.39

Tabla 7.90. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.91. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke modificada

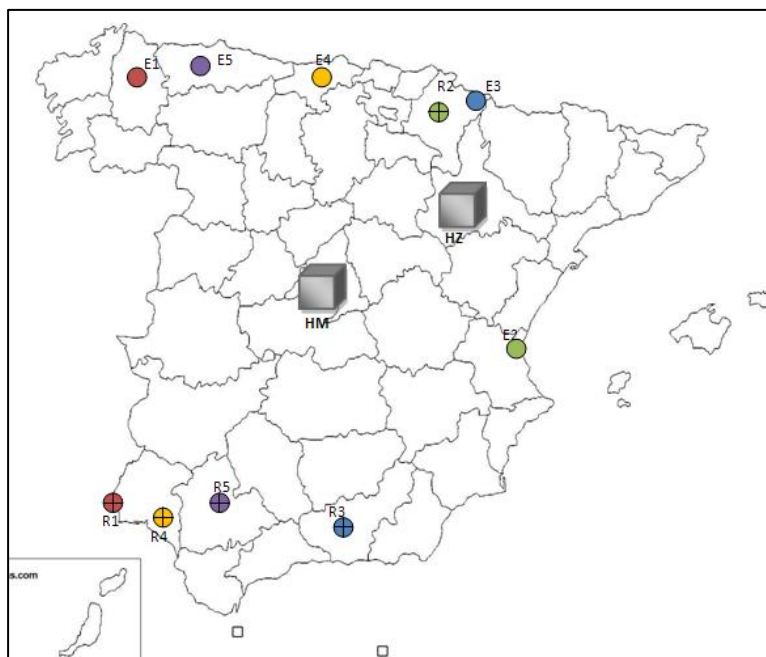


Figura 7.15. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. H&S modif.

En esta estrategia, inicialmente se le asignan a todas las rutas una estrategia de Hub&Spoke. Por la configuración de las elipses y si las restricciones temporales lo permiten, se podrán realizar las siguientes agrupaciones:

- Nodos 1, 4 y 5 con Hub de Alcobendas
- Nodos 3, 4 y 5 con el Hub de Alcobendas

En caso de diferencia de ventanas amplia, si no se permite espera, los nodos de recogida de las órdenes 1, 4 y 5 se agrupan en la misma ruta. Sin embargo, para cumplir las restricciones temporales, solo se agrupan los nodos de entrega 1 y 5, según se muestra en la tabla 7.92.

Carga total: 19			Coste total: 2283.51			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	12	470.42
2	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	11	473.43
1	HUB ALCOBENDAS	Gerdau	Madrid	Cantabria	1	275.38

Tabla 7.92. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si se permite espera, en el trayecto de entrega se agrupan las órdenes 4 y 5, a diferencia de lo que ocurriría en el caso anterior. En este caso, el coste es mayor, como se observa en la tabla 7.93.

Carga total: 19			Coste total: 2451.54			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	12	470.42
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	11	444.48
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	1	472.36

Tabla 7.93. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas es ajustada, todas las órdenes pasan a una estrategia directa, dando como resultado que la unión de las órdenes 1 y 5 cumplen con las condiciones temporales. Así, tanto como si se permite espera como si no, se unen en una misma ruta. El resultado se muestra en las tablas 7.94 y 7.95.

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.94. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. ajustada

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.95. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. ajustada

Como en todos los casos, para una diferencia de ventana mixta, depende de las órdenes a las que se le asigna cada diferencia de ventana. En este caso, se le ha asignado aleatoriamente una ventana amplia a las órdenes 4 y 5. Estas órdenes cumplen las condiciones de las elipses, así que pueden ser agrupadas en una misma orden tanto en el trayecto desde el origen hasta el *hub* como desde el *hub* hasta el destino. Esto ocurre tanto si se permite espera como si no, como se muestra en las tablas 7.96 y 7.97.

Carga total: 19			Coste total: 2702.57			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	ItuCCI	Begonte	Huelva	Lugo	1	651.06
1	ArmillA	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
2	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	11	514.87
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.96. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. mixta

Carga total: 19			Coste total: 2702.57			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	ItuCCI	Begonte	Huelva	Lugo	1	651.06
1	ArmillA	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
2	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	11	514.87
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.97. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. mixta

Estrategia Heurística

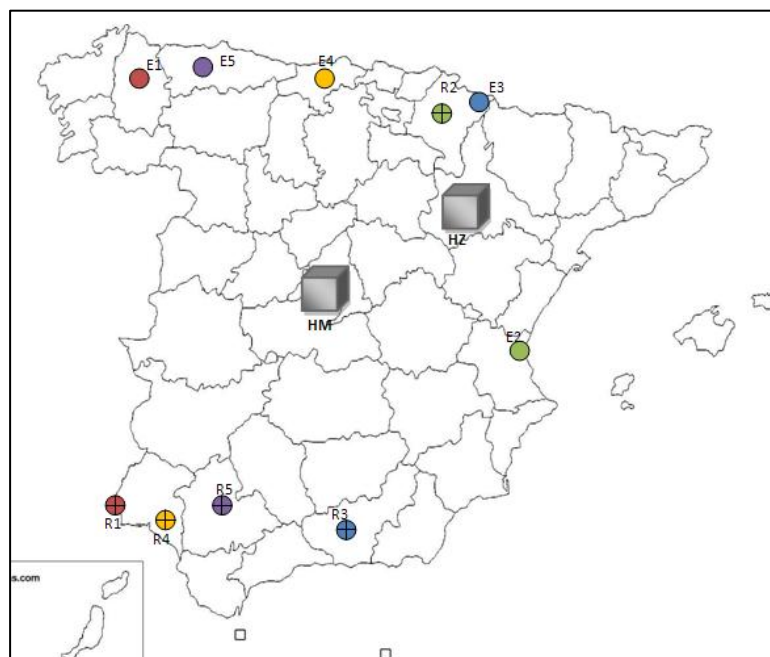


Figura 7.16. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Heurística

En la figura 7.16 se muestra con línea discontinua las órdenes que cumplen las restricciones mostradas en el apartado 4.3 *Metodología* de la memoria, pero al haber una gran distancia entre los nodos de recogida y de entrega, se les asigna en un principio la estrategia de Hub&Spoke. Así, la estrategia heurística funcionará de forma similar a la estrategia de Hub&Spoke modificada. Los resultados, que se muestran de la tabla 7.98 a la tabla 7.103, se muestran iguales a los obtenidos por la técnica de distribución mixta anterior.

Carga total: 19			Coste total: 2283.51			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	12	470.32
2	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	11	473.42
1	HUB ALCOBENDAS	Gerdau	Madrid	Cantabria	1	275.38

Tabla 7.98. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 19			Coste total: 2496.09			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
3	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	12	514.97
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.99. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. amplia

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.100. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 19			Coste total: 2503.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Jara	Gerdau	Huelva	Cantabria	1	673.52
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
2	Cañadas	Cangas Narcea	Sevilla	Asturias	11	765.80

Tabla 7.101. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. Ajustada

Carga total: 19			Coste total: 2702.57			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	ItuCCI	Begonte	Huelva	Lugo	1	651.06
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
2	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	11	514.86
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.102. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 19			Coste total: 2702.57			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	ItuCCI	Begonte	Huelva	Lugo	1	651.06
1	Armillá	Merkatondoa	Granada	Navarra	2	628.08
1	Miguel Estella	Serrans	Navarra	Valencia	5	436.21
2	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	11	514.86
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.103. 5 órd. 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke pura

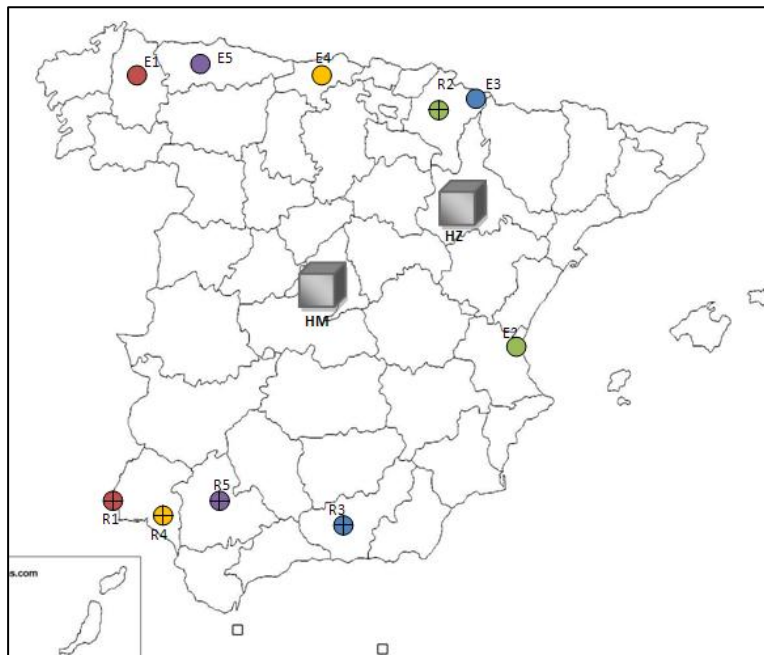


Figura 7.17. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. H&S pura

En esta estrategia se obliga a pasar a todas las órdenes por lo menos por un *hub*. La asignación se realiza adjudicando el *hub* más cercano a cada operación. Como en el caso de Hub&Spoke modificada, si cumplen las condiciones temporales, se podrá agrupar las siguientes órdenes:

- Nodos 1, 4 y 5 con Hub de Alcobendas
- Nodos 3, 4 y 5 con el Hub de Alcobendas

Se observa en la tabla 7.104 que las órdenes 2 y 3 no se agrupan con ninguna otra. A las dos se les asigna el *Hub Plaza*. Por el contrario, el trayecto desde el origen al *hub* de las órdenes 1, 4 y 5 se agrupan en una misma orden. No ocurre igual con el trayecto desde el *hub* hasta el destino, pues solo se unen las órdenes 1 y 5.

Carga total: 19			Coste total: 2302.33			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
3	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	12	470.42
2	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	11	473.43
1	HUB ALCOBENDAS	Gerdau	Madrid	Cantabria	1	275.38

Tabla 7.104. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Sin embargo, si se permite espera, en el trayecto de entrega se agrupan las órdenes 4 y 5 a diferencia de lo que ocurriría en el caso anterior. En este caso, el coste es mayor, como se observa en la tabla 7.105

Carga total: 19			Coste total: 2514.90			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
3	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	12	514.96
2	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36

Tabla 7.105. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas de origen y destino es ajustada, las órdenes no pueden juntarse a otras en la misma ruta. Así, aparecen 5 rutas desde los orígenes hasta el *hub* asignado y 5 rutas desde el *hub* hasta el destino. El resultado es el mismo tanto si se permite espera, tabla 7.107, como si no se permite, tabla 7.106.

Carga total: 19			Coste total: 3471.38			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
1	Itucci	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	424.03
1	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	454.38
1	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	10	409.82
1	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	10	380.19
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Gerdau	Madrid	Cantabria	1	275.38

Tabla 7.106. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 19			Coste total: 3471.38			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
1	Itucci	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	424.03
1	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	454.38
1	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	10	409.82
1	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	10	380.19
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47
1	HUB ALCOBENDAS	Gerdau	Madrid	Cantabria	1	275.38

Tabla 7.107. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. ajustada

Por último, en el caso de diferencia entre ventanas mixta, se ha asignado diferencia amplia a las órdenes 4 y 5. Así, son las únicas que se unen en los trayectos desde el *hub* hasta el destino. En el resto de casos, no da tiempo a realizar la entrega en el destino si se agrupan varias órdenes. El resultado es el mismo tanto si se permite espera, tabla 7.109, como si no se permite, tabla 7.108.

Carga total: 19			Coste total: 3288.17			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
1	Itucci	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	424.03
1	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	454.38
1	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	10	409.82
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47

Tabla 7.108. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 19			Coste total: 3288.17			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Armillá	HUB PLAZA	Granada	Zaragoza	2	467.91
1	Miguel Estella	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	5	173.95
1	HUB PLAZA	Serrans	Zaragoza	Valencia	5	266.68
1	HUB PLAZA	Merkatondoa	Zaragoza	Navarra	2	174.54
1	Itucci	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	424.03
1	Jara	HUB ALCOBENDAS	Huelva	Madrid	1	454.38
1	Cañadas	HUB ALCOBENDAS	Sevilla	Madrid	10	409.82
2	HUB ALCOBENDAS	Cangas Narcea	Madrid	Asturias	11	472.36
1	HUB ALCOBENDAS	Begonte	Madrid	Lugo	1	444.47

Tabla 7.109. 5 órd. 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. mixta

7.3.2 Caso 2

El resultado de la generación aleatoria de nodos se muestra en las tablas 7.110, 7.111 y 7.112. En la primera de ellas, la diferencia entre la ventana de recogida y de entrega es amplia, en el segundo caso la diferencia es estrecha y en el tercer caso es una combinación aleatoria de ambas. En este caso, solo la orden 1 tiene una ventana estrecha. Las demás órdenes tienen una diferencia entre ventanas amplia, lo que facilitará las agrupaciones.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	840	1140	1860	2160	13
2	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	840	1140	1860	2160	5
3	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	.Vizcaya	840	1140	1860	2160	10
4	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	840	1140	1860	2160	3
5	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	840	1140	1860	2160	6

Tabla 7.110 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	840	1140	1392	1692	13
2	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	840	1140	1151	1451	5
3	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	840	1140	1441	1741	10
4	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	840	1140	1103	1403	3
5	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	840	1140	1363	1663	6

Tabla 7.111 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	840	1140	1392	1692	13
2	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	840	1140	1860	2160	5
3	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	840	1140	1860	2160	10
4	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	840	1140	1860	2160	3
5	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	840	1140	1860	2160	6

Tabla 7.112 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana mixta

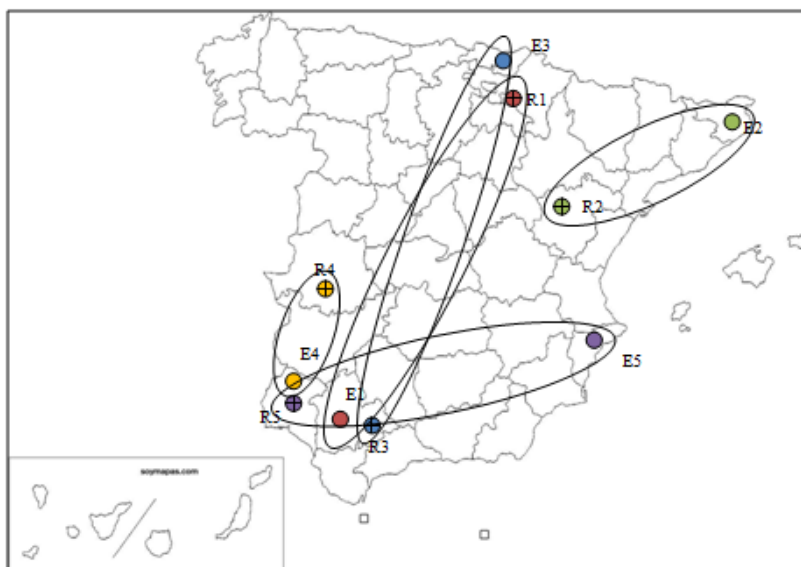
Estrategia directa pura

Figura 7.18. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Directa pura

En la figura 7.18 de localización de los nodos se observa que ninguna de las órdenes cumple con la restricción 2 que aparece en el apartado 4.3 *Metodología* en la memoria. Aunque las órdenes 1 y 3 tengan nodos en zonas próximas, el nodo de recogida de la orden 1 se encuentra cerca del nodo de entrega de la orden 3 y viceversa. De este modo, si se impone que las rutas deben tener una estrategia de distribución directa, no se realizará ninguna agrupación en ninguna combinación, debido a la situación de los nodos. De la tabla 7.113 a la tabla 7.118 se muestran los resultados, que son iguales para todas las combinaciones.

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Agurain	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.113. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altos	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.114. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. amplia

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altos	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.115. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altos	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.116. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. ajustada

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altos	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.117. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguraín	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altos	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.118. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. mixta

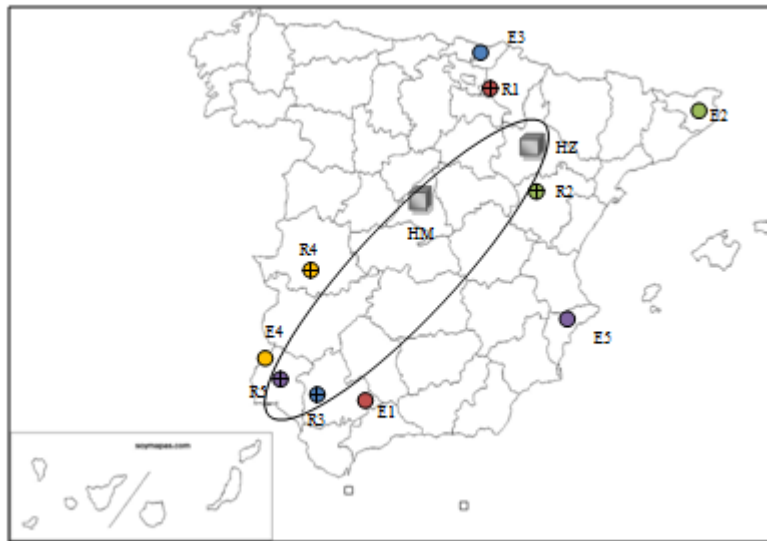
Estrategia Hub&Spoke modificada

Figura 7.19. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. H&S modif.

Observando la configuración de las órdenes de envío, se puede observar que, si cumplen las restricciones temporales, se podrían agrupar solamente las órdenes 3 y 5 en el trayecto entre el nodo de recogida y el hub.

Así, aunque en esta estrategia se asigna en un principio a todas las órdenes una estrategia de Hub&Spoke, las órdenes 1,2 y 4 pasan a una estrategia directa porque no se agrupan en ningún recorrido. Sin embargo, las órdenes 3 y 5 sí que se agrupan entre el origen y el hub más cercano a las operaciones, que es el Hub de Plaza. Con esta agrupación se consigue reducir el coste total respecto al caso de que todas las órdenes siguieran una estrategia de envío directa. El resultado es el mismo tanto si se permite espera como si no, como aparece en las tablas 7.119 y 7.120.

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.119. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. amplia

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.120. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas es ajustada, no hay holgura suficiente para que ninguna ruta se agrupe con otra, así que pasan todas a una estrategia de envío directa, sin posibilidad de juntarse con ninguna otra orden. Tablas 7.121 y 7.122

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.121. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.122. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. ajustada

En las últimas combinaciones, con una diferencia de ventana mixta, a las órdenes que cumplen las restricciones de localización para ser agrupadas, las órdenes 3 y 5, se les ha asignado una diferencia de ventana amplia. Así, igual que sucedía en las primeras combinaciones, se agruparán en el trayecto entre el origen y el hub de Plaza. Los resultados, tanto si se permite espera como no son iguales, como aparecen en las tablas 7.123 y 7.124.

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.123. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. mixta

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.124. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. mixta

Estrategia heurística

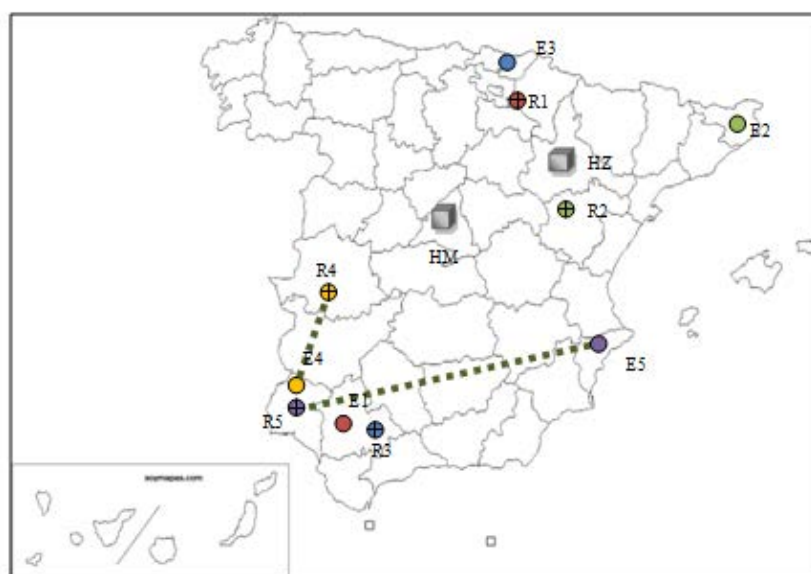


Figura 7.20. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Heurística

En la figura 7.20 aparecen representados con líneas discontinuas las órdenes que cumplen con las restricciones mostradas en el apartado 4.2 Metodología para ser consideradas directas. Sin embargo, los nodos de la orden 5 se encuentran a más de 150 km, así que se le asignará un *hub*, al igual que a las órdenes 1, 2 y 3.

Una vez asignados, se comprueba que no se produce agrupación en ningún trayecto para las órdenes 1 y 2 y pasan a una estrategia directa, junto con la 4. Las órdenes 3 y 5 se juntan en el trayecto entre los orígenes y el Hub de Plaza. El resultado es el mismo tanto si se permite espera como si no, como aparece en las tablas 7.125 y 7.126.

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.125. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.126. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre ventanas es ajustada, no hay tiempo suficiente para hacer ninguna agrupación y las órdenes serán todas directas. Tablas 7.127 y 7.128.

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.127. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.128. 5 órd. 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. ajustada

En el caso de que la ventana sea mixta, como las órdenes 3 y 5 tienen una diferencia entre ventanas amplia, se agrupan en el caso de que la espera esté permitida. Tablas 7.129 y 7.130

Carga total: 37			Coste total: 2627.46			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	13	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Chaparrilla	Zorrozaurre	Sevilla	Vizcaya	10	701.54
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	3	644.48
1	Lepe	Cotes Altas	Huelva	Alicante	6	363.57

Tabla 7.129. 5 ord. 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 37			Coste total: 2524.80			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	Canama	Álava	Sevilla	2	610.98
1	Calamocha	Sarrión	Teruel	Girona	5	306.89
1	Sepes Plasencia	Dominicano	Cáceres	Huelva	2	644.48
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Cotes Altas	Zaragoza	Alicante	10	260.76

Tabla 7.130. 5 ord. 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke pura

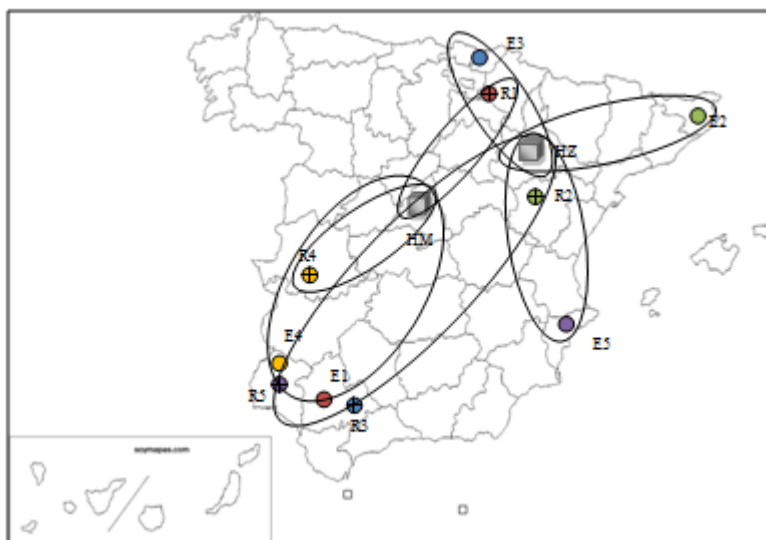


Figura 7.21. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. H&S pura

Con esta estrategia, todas las órdenes tienen que pasar al menos por un *hub*. En este caso, el *hub* asignado a cada orden es:

- Orden 1: Hub Alcobendas
- Orden 2: Hub Plaza
- Orden 3: Hub Plaza
- Orden 4: Hub Alcobendas
- Orden 5: Hub Plaza

Con la asignación de *hubs* anterior se pueden realizar las siguientes agrupaciones:

- Recogida de de las órdenes 3 y 5 con el Hub de Plaza
- Entrega de las órdenes 1 y 4 con el Hub de Alcobendas

En la tablas 7.131 y 7.132 se muestran los resultados en caso de que la diferencia entre las ventanas de recogida y de entrega sea amplia. Como los nodos se encuentran muy próximos y existe holgura suficiente para realizar los trayectos, se producen las agrupaciones que se han mostrado antes. Así, las órdenes 3 y 5 se agrupan en el trayecto entre el origen y el Hub de Plaza y las órdenes 1 y 4 se agrupan en el trayecto entre el hub y el destino. El resultado es el mismo tanto si se permite espera como si no.

Carga total: 37			Coste total: 2625.15			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
2	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	16	479.97
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76
1	HUB PLAZA	Cotes Altos	Zaragoza	Alicante	6	288.19

Tabla 7.132. 5 ord. 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 37			Coste total: 2625.15			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
2	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	16	479.97
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76
1	HUB PLAZA	Cotes Altos	Zaragoza	Alicante	6	288.19

Tabla 7.133. 5 ord. 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas de origen y destino es ajustada, las órdenes no pueden juntarse a otras en la misma ruta. Así, aparecen 5 rutas desde los orígenes hasta el

hub asignado y 5 rutas desde el hub hasta el destino. El resultado es el mismo tanto si se permite espera, tabla 7.134, como si no se permite, tabla 7.133.

Carga total: 37			Coste total: 3487.15			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	HUB ALCOBENDAS	Canama	Madrid	Sevilla	13	369.67
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
1	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	6	632.74
1	HUB PLAZA	Cotes Altos	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	Chaparrilla	HUB PLAZA	Sevilla	Zaragoza	10	545.99
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76

Tabla 7.133. 5 ord. 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 37			Coste total: 3487.15			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	HUB ALCOBENDAS	Canama	Madrid	Sevilla	13	369.67
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
1	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	6	632.74
1	HUB PLAZA	Cotes Altos	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	Chaparrilla	HUB PLAZA	Sevilla	Zaragoza	10	545.99
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76

Tabla 7.134. 5 ord. 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. ajustada

Por último, en el caso de diferencia entre ventanas mixta, se ha asignado diferencia amplia a las órdenes 2, 3, 4 y 5. Como ocurría en el caso de diferencia entre ventanas amplia, las órdenes 3 y 5 se agrupan, pero no ocurre igual con la 1 y la 4 porque la orden 1 tiene una diferencia entre ventanas estrecha. El resultado es el mismo tanto si se permite espera, tabla 7.136, como si no se permite, tabla 7.135.

Carga total: 37			Coste total: 2969.34			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	HUB ALCOBENDAS	Canama	Madrid	Sevilla	13	369.67
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Cotes Altos	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76

Tabla 7.135. 5 ord. 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 37			Coste total: 2969.34			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Aguráin	HUB ALCOBENDAS	Álava	Madrid	13	276.18
1	HUB ALCOBENDAS	Canama	Madrid	Sevilla	13	369.67
1	Sepes Plasencia	HUB ALCOBENDAS	Cáceres	Madrid	3	218.25
1	HUB ALCOBENDAS	Dominicano	Madrid	Huelva	3	454.49
1	Calamocha	HUB PLAZA	Teruel	Zaragoza	5	45.30
1	HUB PLAZA	Sarrión	Zaragoza	Girona	5	395.59
2	Lepe	HUB PLAZA	Huelva	Zaragoza	16	660.92
1	HUB PLAZA	Cotes Altes	Zaragoza	Alicante	6	288.19
1	HUB PLAZA	Zorrozaurre	Zaragoza	Vizcaya	10	260.76

Tabla 7.136. 5 órd. 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. mixta

7.3.3 Caso 3

En las tablas 7.137, 7.138 y 7.139 se muestran los nodos de las órdenes junto con las ventanas de recogida y de entrega y la carga de cada orden. Como en los casos anteriores, aparecen separados según el tipo de diferencia entre las ventanas. En el caso de diferencia mixta, tabla 7.139, en este caso de simulación, se ha asignado diferencia amplia a las órdenes 1, 3 y 4 y diferencia estrecha a las órdenes 2 y 5.

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	840	1140	1860	2160	11
2	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	840	1140	1860	2160	3
3	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	840	1140	1860	2160	1
4	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	840	1140	1860	2160	9
5	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	840	1140	1860	2160	12

Tabla 7.137 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana amplia

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	840	1140	1441	1741	11
2	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	840	1140	929	1229	3
3	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	840	1140	1489	1789	1
4	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	840	1140	1109	1409	9
5	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	840	1140	1393	1693	12

Tabla 7.138 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana ajustada

Nº orden	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Ventana recogida inferior	Ventana recogida superior	Ventana entrega inferior	Ventana entrega superior	Carga
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	840	1140	1860	2160	11
2	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	840	1140	929	1229	3
3	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	840	1140	1860	2160	1
4	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	840	1140	1860	2160	9
5	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	840	1140	1393	1693	12

Tabla 7.139 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana mixta

Estrategia directa pura

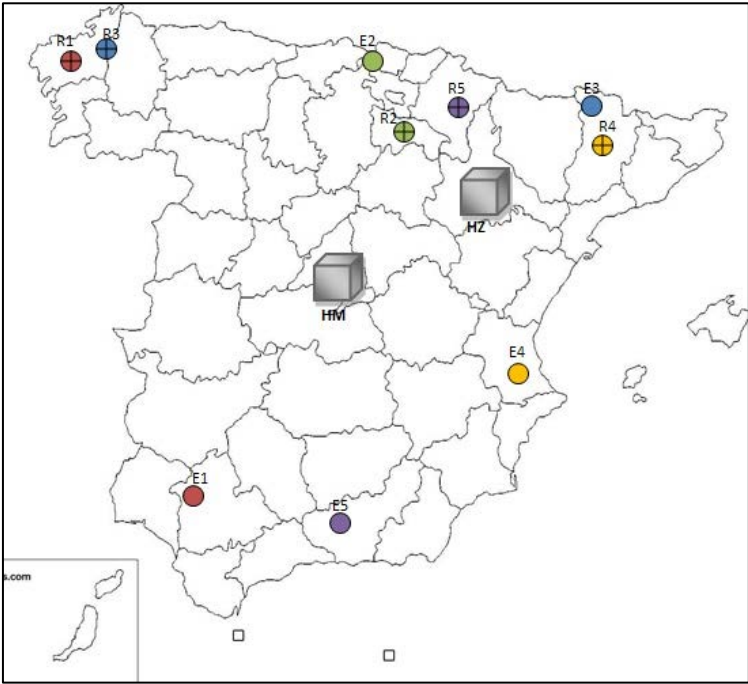


Figura 7.22. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Directa pura

Como se puede observar en la figura 7.22, la localización dispersa de los nodos hace que si se sigue una estrategia de distribución directa pura, resulte imposible la agrupación de dos o más órdenes en una misma ruta. Los nodos no cumplen la condición de localización que se explica en el apartado 3.2 *Restricciones* de la memoria. Los resultados son los mismos para las 6 combinaciones de parámetros.

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.140. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.141. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.142. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.143. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.144. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.145. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. mixta

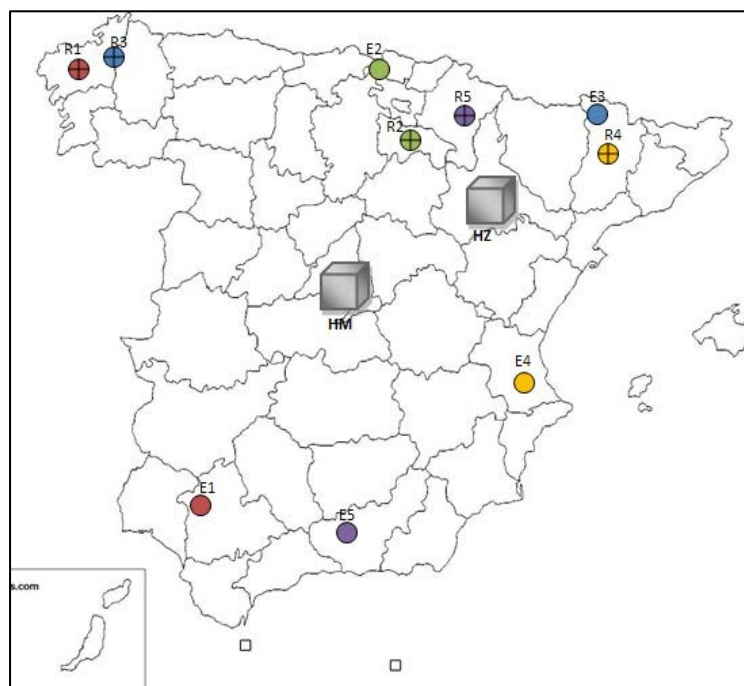
HUB&SPOKE modificada

Figura 7.23. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. H&S modif

En esta estrategia, inicialmente se le asignan a todas las rutas una estrategia de Hub&Spoke. Por la configuración de las elipses y si las restricciones temporales lo permiten, se podrán realizar las siguientes agrupaciones:

- Nodos de recogida 2 y 5

Aunque puede parecer que las órdenes 1 y 3 se pueden agrupar en el trayecto hasta el Hub de Alcobendas, se comprueba que al realizar la elipse según se explica en la memoria, con el inicio de la ruta en el nodo Arteixo, el nodo de Alcampo Ferrol no pertenece a la elipse, según la figura 7.24.

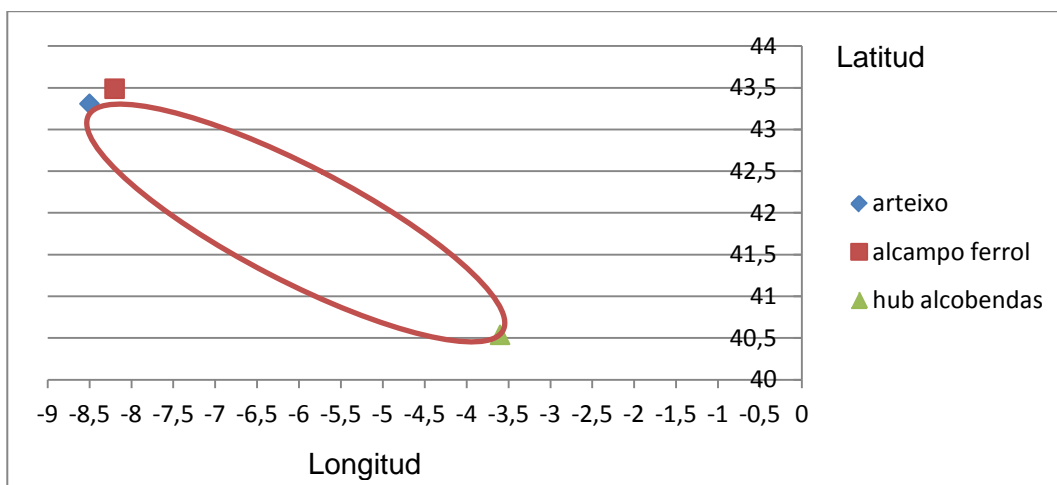


Figura 7.24. Situación particular de nodos

En caso de diferencia de ventanas amplia los nodos de recogida de las órdenes 1 y 3 se agrupan en la misma ruta, aunque ello conlleve un aumento en el coste. El resto de órdenes no se pueden agrupar debido a la lejanía de sus nodos. La agrupación se produce tanto si se permite espera como si no. Tablas 7.146 y 7.147.

Carga total: 36			Coste total: 2818.84			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
2	Elortz	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	15	233.25
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	12	168.88
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36

Tabla 7.146. 5 ord. 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 2818.84			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
2	Elortz	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	15	233.25
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	12	168.88
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36

Tabla 7.147. 5 ord. 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas es ajustada, no hay tiempo suficiente para que se agrupen las rutas en ningún trayecto, así que todas las órdenes pasan a una estrategia directa.

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.148. 5 ord. 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.149. 5 ord. 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. ajustada

En este caso, las únicas órdenes con posibilidades de agruparse son la 2 y la 5, pero a ambas órdenes se les ha asignado una diferencia entre ventanas estrecha, así que no tendrán el tiempo necesario para poder agruparse, así que en estos casos, serán otra vez todas las rutas directas sin agrupaciones.

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.150. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. mixta

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.151. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. mixta

Estrategia heurística

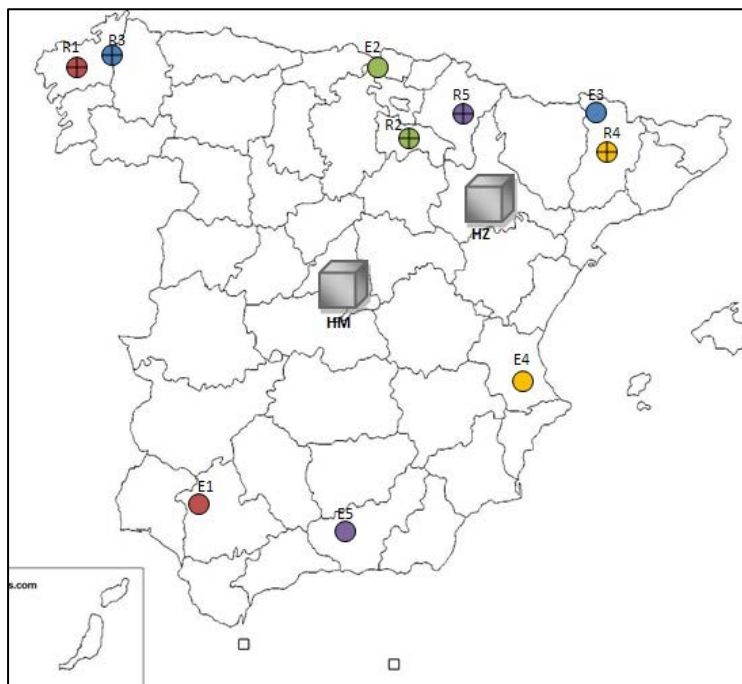


Figura 7.25. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Heurística

En la figura 7.24 se muestra con línea discontinua las órdenes que cumplen las restricciones mostradas en el apartado 4.3 *Metodología* de la memoria, pero solo la orden 2 cumple la condición de cercanía entre sus nodos. Así, a esta orden se le asigna una estrategia directa. Al resto de órdenes se le asigna un *hub*. Tras asignarles este hub, y comprobarse que ninguna de ellas puede ser agrupada, pasan todas a estrategia directa. Esto ocurre para todas las combinaciones. La única posibilidad de agrupación sería entre el origen de las rutas 2 y 5 y el Hub de Plaza, pero a la orden se le asigna la estrategia directa desde el principio.

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.152. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.153. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.154. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.155. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.156. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta

Carga total: 36			Coste total: 2522.76			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	Cantosales	Coruña	Sevilla	11	701.17
1	Cantabria I	Portugalete	La Rioja	Vizcaya	3	104.74
1	Alcampo ferrol	Alcoletge	Coruña	Lérida	1	757.31
1	Bellpuig	Benito	Lérida	Valencia	9	314.15
1	Elortz	CC Granada	Navarra	Granada	12	645.40

Tabla 7.157. 5 órd. 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta

Estrategia Hub&Spoke pura

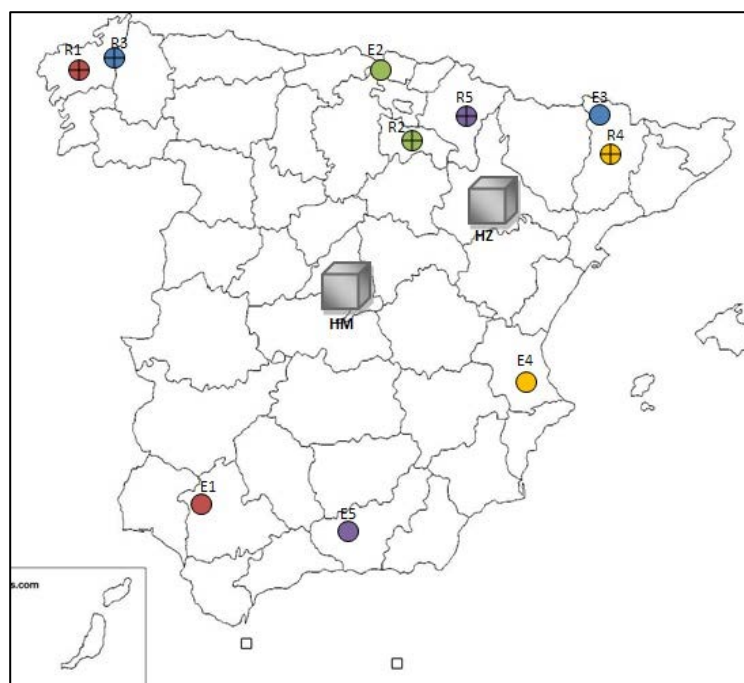


Figura 7.26. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. H&S pura

En esta estrategia se obliga a pasar a todas las órdenes por lo menos por un *hub*. La asignación se realiza adjudicando el *hub* más cercano a cada operación.

Como en casos anteriores, solo se permite la agrupación de las órdenes 2 y 5 en el trayecto entre el origen y el Hub de Plaza. La orden 5 continúa su trayecto hasta la provincia de Granada pasando por el Hub de Alcobendas. Ocurre lo mismo tanto si se permite espera como si no. Tablas 7.158 y 7.159

Carga total: 36			Coste total: 3272.07			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
2	Elortz	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	15	233.25
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	12	168.88
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36

Tabla 7.158. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. amplia

Carga total: 36			Coste total: 3272.07			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
2	Elortz	HUB PLAZA	Navarra	Zaragoza	15	233.25
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73
1	HUB PLAZA	HUB ALCOBENDAS	Zaragoza	Madrid	12	168.88
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36

Tabla 7.159. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia

Si la diferencia entre las ventanas de origen y destino es ajustada, ninguna orden puede agruparse en ningún trayecto. Así, aparecen 5 rutas desde los orígenes hasta el *hub* asignado y 5 rutas desde el *hub* hasta el destino. El resultado es el mismo tanto si se permite espera, tabla 7.161, como si no se permite, tabla 7.160.

Carga total: 36			Coste total: 3329.49			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
1	Elortz	HUB ALCOBENDAS	Navarra	Madrid	12	296.86
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36
1	Cantabria I	HUB PLAZA	La Rioja	Zaragoza	3	162.70
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73

Tabla 7.160. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. ajustada

Carga total: 36			Coste total: 3329.49			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
1	Elortz	HUB ALCOBENDAS	Navarra	Madrid	12	296.86
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36
1	Cantabria I	HUB PLAZA	La Rioja	Zaragoza	3	162.70
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73

Tabla 7.161. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia

Por último, en el caso de diferencia entre ventanas mixta, se ha asignado a las únicas órdenes con posibilidad de agruparse, la 2 y la 5, una diferencia entre ventanas estrecha, así que no tienen tiempo suficiente para agruparse. El resultado es el mismo que en el caso anterior de diferencia estrecha.

Carga total: 36			Coste total: 3329.49			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
1	Elortz	HUB ALCOBENDAS	Navarra	Madrid	12	296.86
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36
1	Cantabria I	HUB PLAZA	La Rioja	Zaragoza	3	162.70
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73

Tabla 7.162. 5 órd. 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta

Carga total: 36			Coste total: 3329.49			
Nº órdenes	Nodo recogida	Nodo entrega	Provincia recogida	Provincia entrega	Carga	Coste
1	Arteixo	HUB ALCOBENDAS	Coruña	Madrid	11	507.07
1	HUB ALCOBENDAS	Cantosales	Madrid	Sevilla	11	396.60
1	Bellpuig	HUB PLAZA	Lérida	Zaragoza	9	239.58
1	HUB PLAZA	Benito	Zaragoza	Valencia	9	274.88
1	Alcampo ferrol	HUB PLAZA	Coruña	Zaragoza	1	592.59
1	HUB PLAZA	Alcoletge	Zaragoza	Lérida	1	215.14
1	Elortz	HUB ALCOBENDAS	Navarra	Madrid	12	296.86
1	HUB ALCOBENDAS	CC Granada	Madrid	Granada	12	377.36
1	Cantabria I	HUB PLAZA	La Rioja	Zaragoza	3	162.70
1	HUB PLAZA	Portugalete	Zaragoza	Vizcaya	3	266.73

Tabla 7.163. 5 ord. 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. mixta

ANEXO VIII

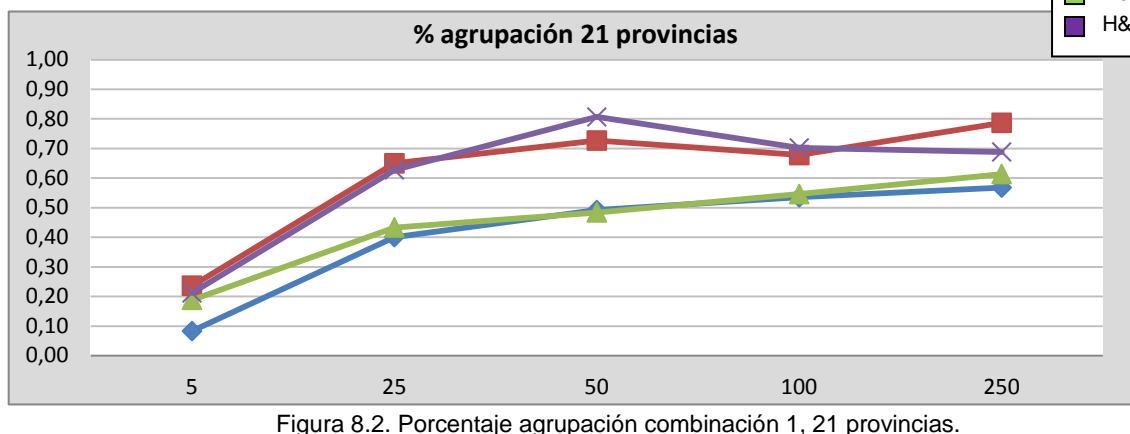
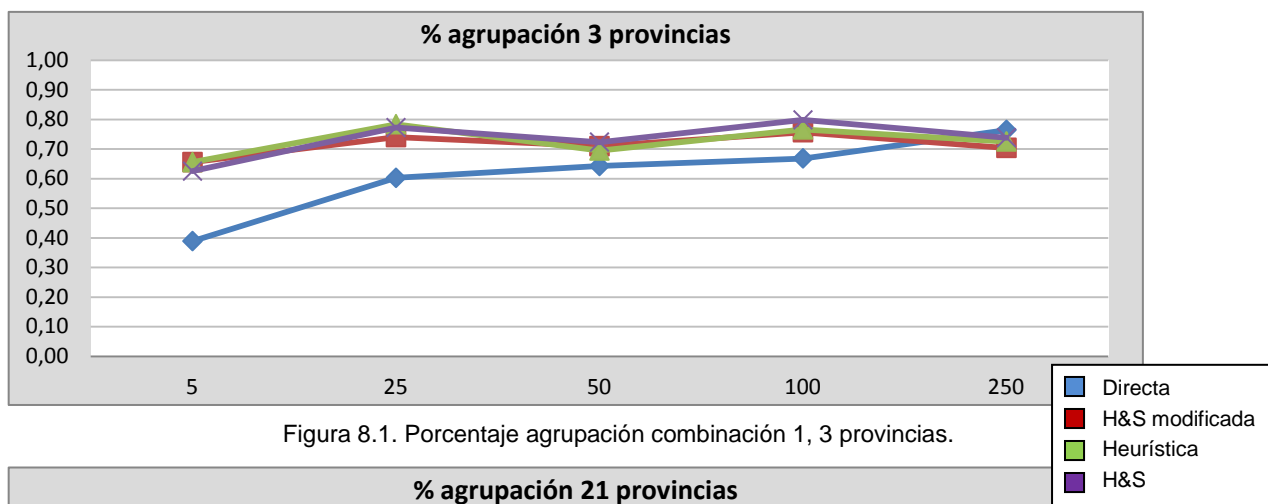
% Agrupación Vs Nº de envíos

A continuación se va a estudiar el porcentaje de agrupación de rutas para distinto número de órdenes de envío en función de los parámetros utilizados. Se va a realizar un análisis para cada una de las 6 combinaciones de parámetros que aparecen en la tabla 4.1 de la memoria.

Combinación 1

Diferencia entre ventanas → Amplia

Se permite espera → Sí



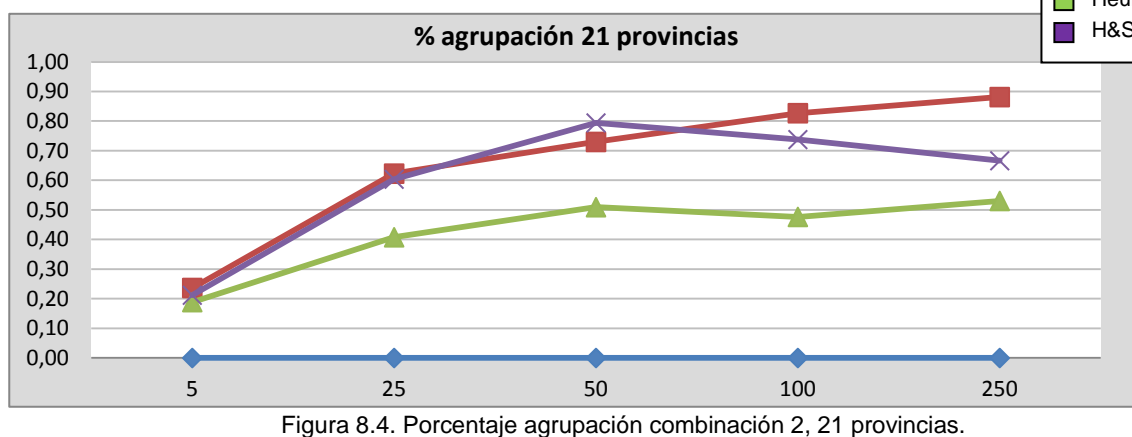
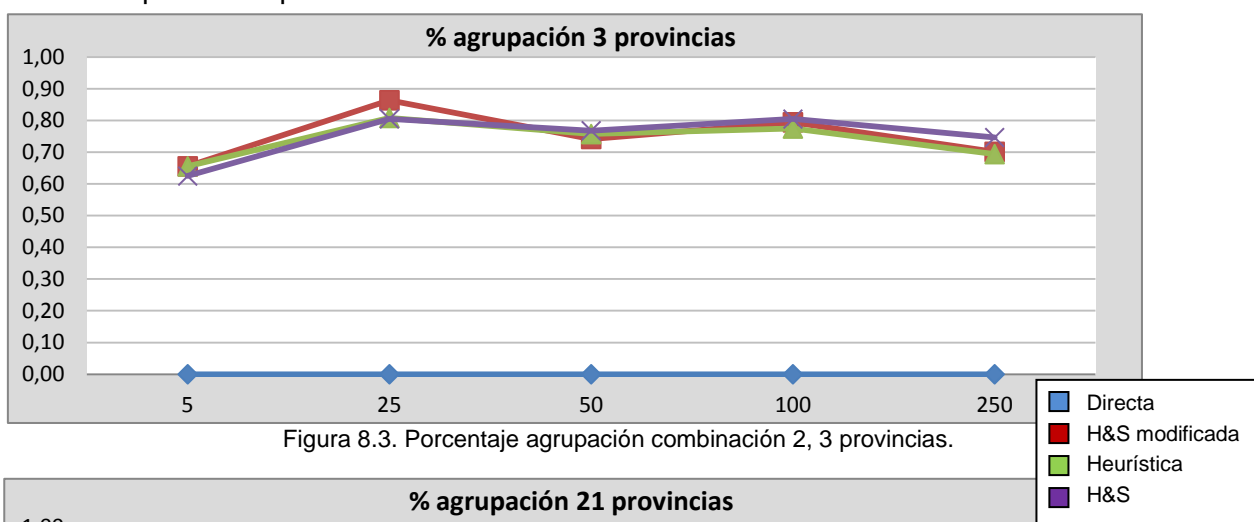
En caso de que los nodos estén concentrados en 3 provincias, hay una alta probabilidad de que coincidan los orígenes y/o destinos de más de una orden, así que el porcentaje de agrupación es alto en todos los casos. El porcentaje de agrupación de rutas no se ve muy influenciado por el número de envíos.

Sin embargo, para el caso en que los nodos estén repartidos en 21 provincias, el porcentaje de agrupación aumenta con el tamaño del problema, ya que la probabilidad de que coincidan los nodos de origen y/o destino también aumenta. Para las estrategias de Hub&Spoke y Hub&Spoke modificada, los resultados se aproximan a los valores de 3 provincias a partir de 25 órdenes, por la flexibilidad de las condiciones temporales. En la estrategia heurística, a pesar de ser mixta, este porcentaje es menor, ya que por la metodología utilizada, los envíos directos tienen mayor predominio en la estrategia heurística que en la estrategia de H&S modificada y estos envíos no salen beneficiados de la flexibilidad de las condiciones temporales.

Combinación 2

Diferencia entre ventanas → Amplia

Se permite espera → NO



Con estas condiciones, como se comenta en la tabla 4.2 de la memoria, la estrategia directa tiene un porcentaje de agrupación nulo, independiente del número de envíos y de la dispersión de los nodos.

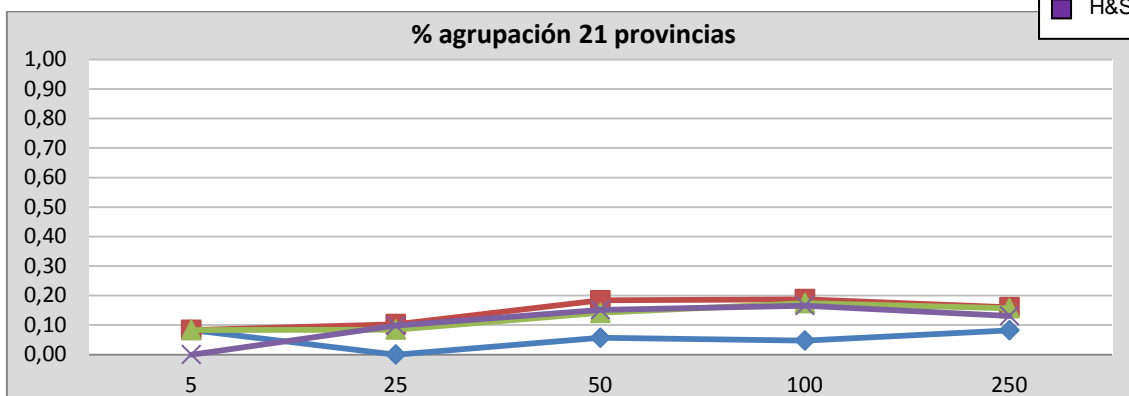
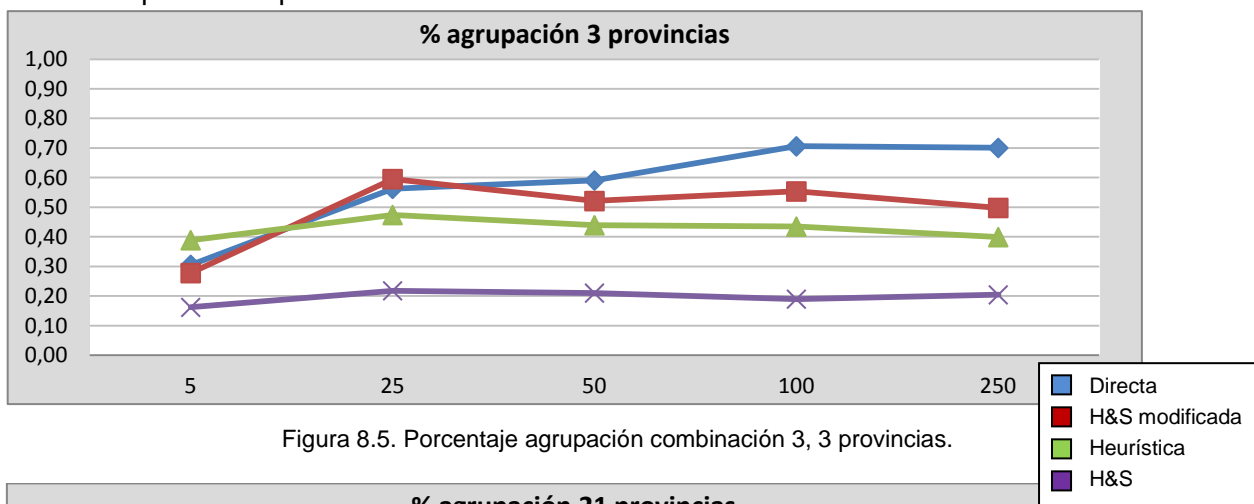
Para el resto de estrategias, el comportamiento es similar en ambos casos al caso anterior. Como puntualización, en el caso de 21 provincias, la diferencia entre las

agrupaciones de las dos estrategias mixtas, H&S modificada y heurística, aumenta ligeramente ya que el porcentaje de agrupación es nulo en los envíos directos, y estos se encuentran en mayor medida en la estrategia heurística.

Combinación 3

Diferencia entre ventanas → Reducida

Se permite espera → Sí



En el caso de tener los nodos concentrados en 3 provincias, la estrategia directa presenta el porcentaje de agrupación mayor, ya que las condiciones temporales ajustadas benefician a este tipo de distribución. En cambio, perjudican a la estrategia de Hub&Spoke, ya que al obligar a pasar el envío por un hub, resulta difícil agrupar dos órdenes en el tiempo reducido con el que se cuenta.

En este caso, por la metodología utilizada, la estrategia H&S modificada tiene a un mayor porcentaje de envíos directos, de forma que la agrupación de rutas es mayor que en el caso de estrategia heurística. Al ser la estrategia directa la más beneficiada en estas condiciones, los resultados de las estrategias mixtas dependerán de la probabilidad de que

los nodos de origen y destino coincidan. Por ello, en el caso de 21 provincias esta probabilidad es menor y obtiene peores resultados, mejorándose conforme aumenta el tamaño del problema.

Combinación 4

Diferencia entre ventanas → Reducida

Se permite espera → NO

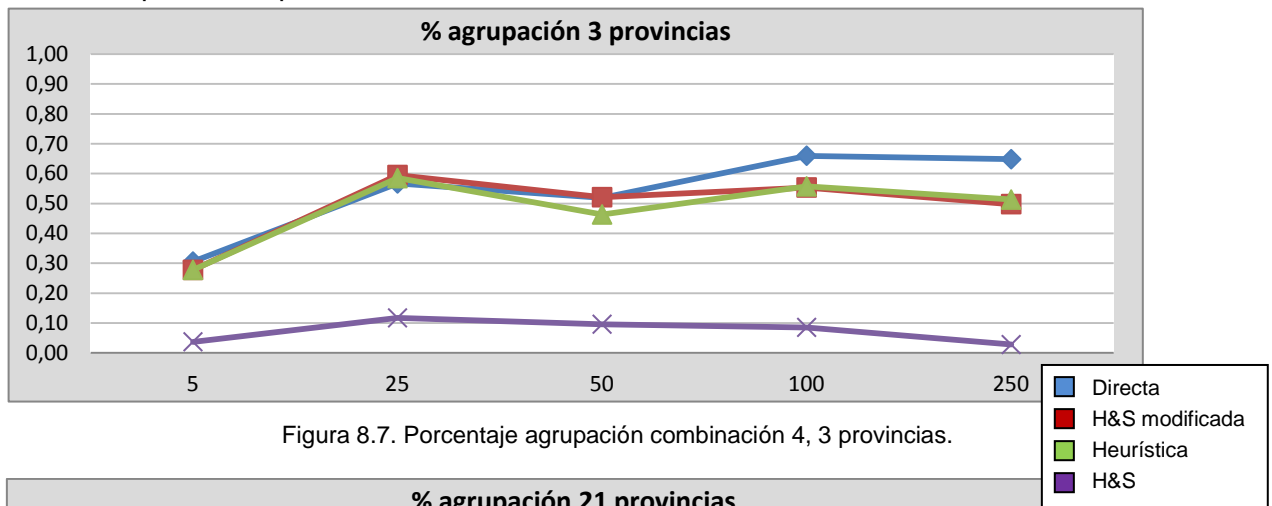


Figura 8.7. Porcentaje agrupación combinación 4, 3 provincias.

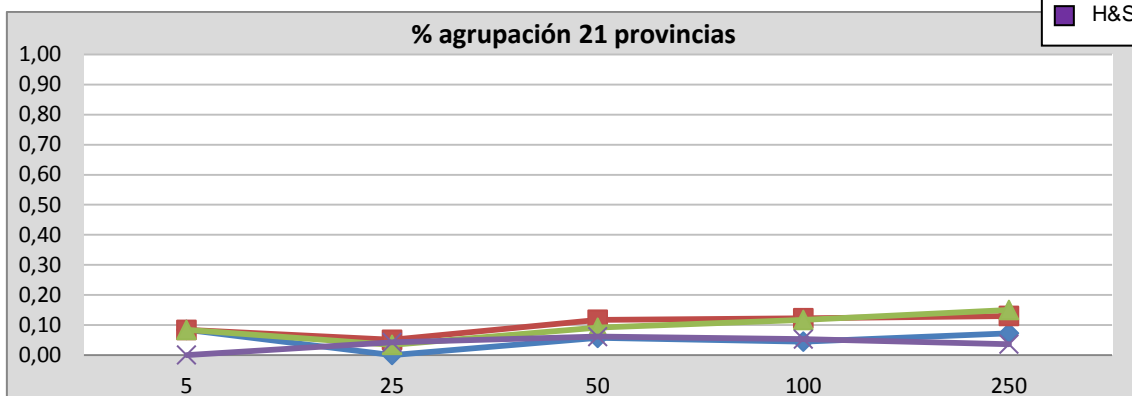


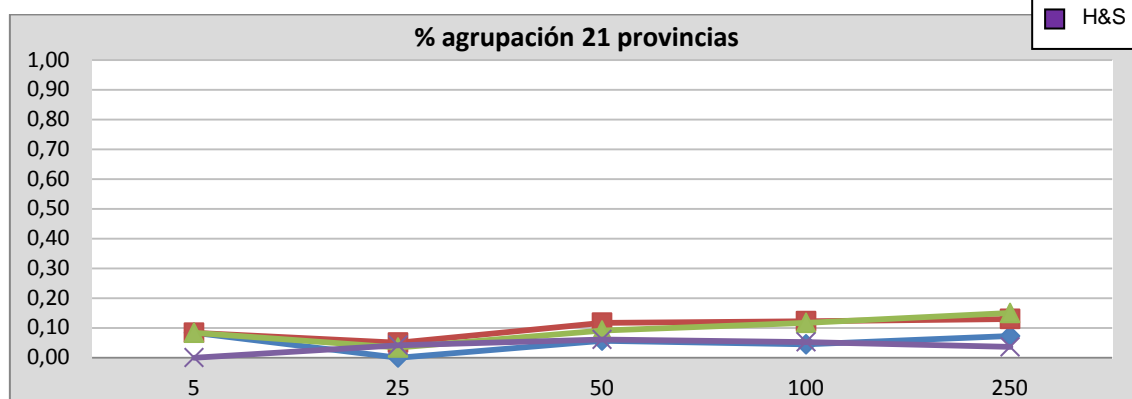
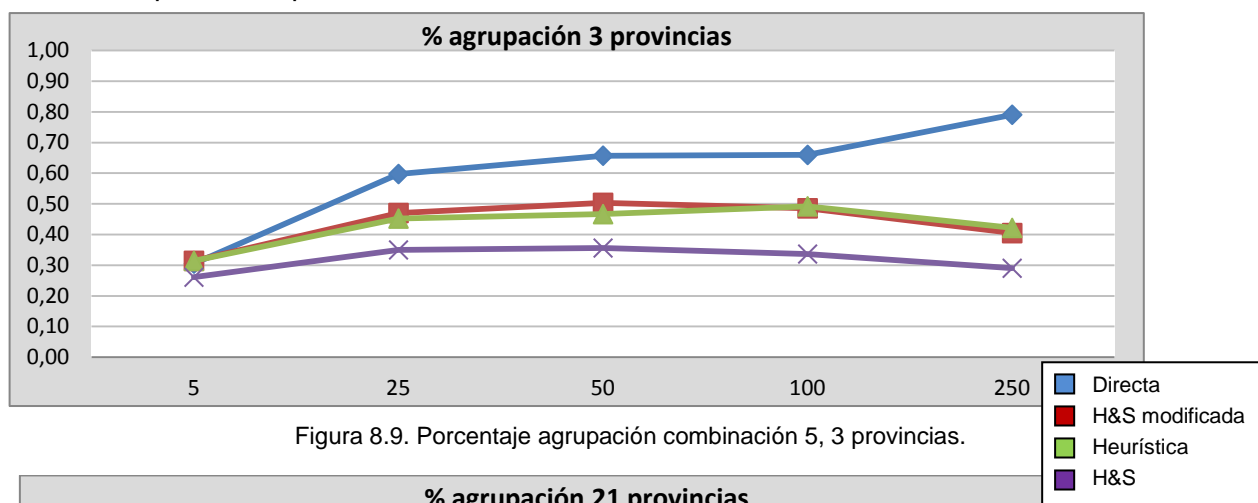
Figura 8.8. Porcentaje agrupación combinación 4, 21 provincias.

El resultado obtenido si no se permite espera es similar al obtenido si se permite espera, ya que la diferencia tan ajustada de tiempo provoca que la influencia de permitir espera en el porcentaje de agrupación sea muy baja.

Combinación 5

Diferencia entre ventanas → Mixta

Se permite espera → Sí



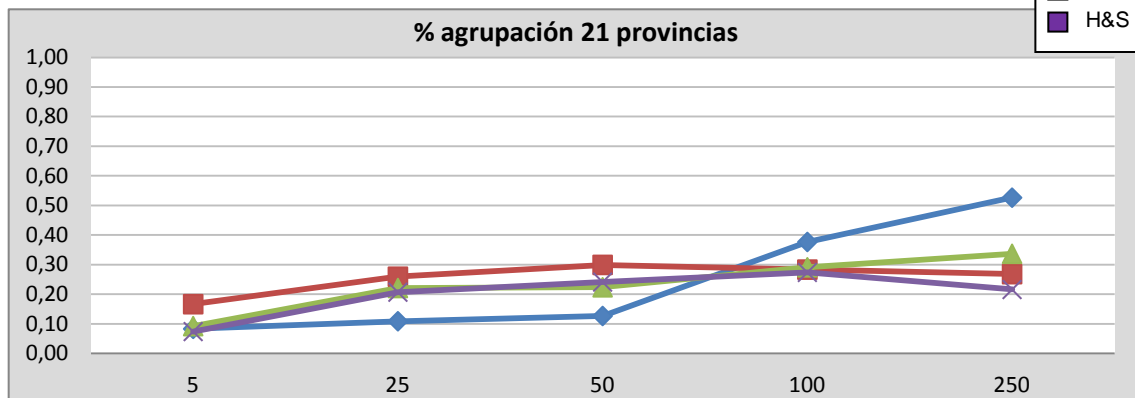
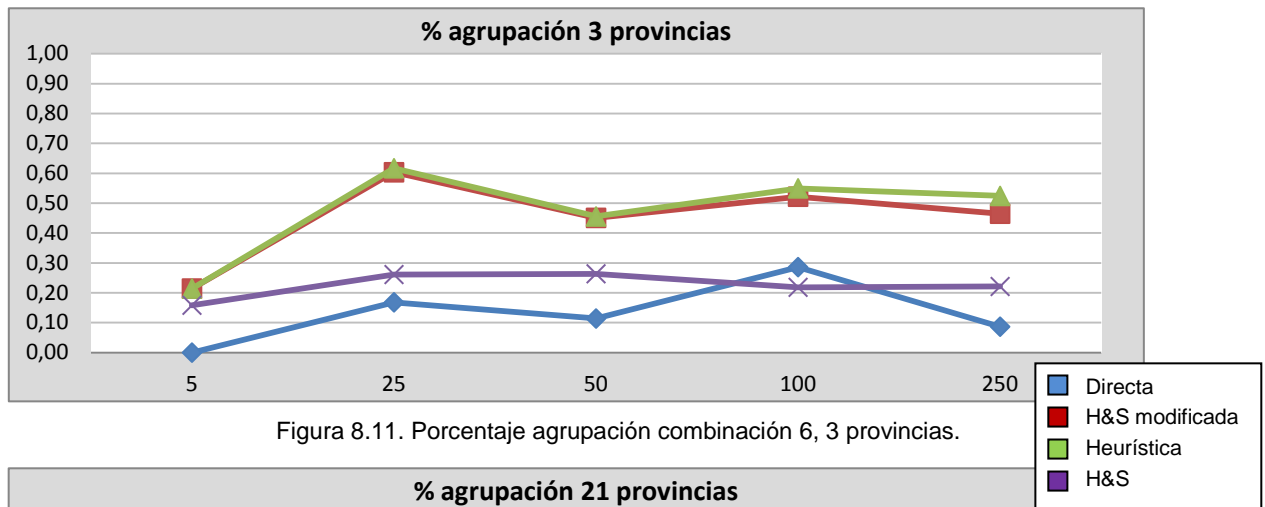
En el caso de que la diferencia entre las ventanas temporales sea mixta, la estrategia directa es la que mejor resultados obtiene, ya que permite agrupación tanto de las órdenes a las que se les asigna diferencia ajustada como a las que se les asigna diferencia amplia, gracias a que se permite espera. Sin embargo, las órdenes que pasan a través de un hub se ven perjudicadas. Por esta razón, la estrategia Hub & Spoke devuelve los peores resultados y las estrategias mixtas se encuentran entre medio de las dos puras. En el caso de las estrategias mixtas, para este caso el porcentaje de envíos directos es similar en ambas, ya que las condiciones temporales no benefician a ninguna. Por ello, el resultado obtenido por la estrategia heurística es próximo al obtenido por la estrategia de Hub&Spoke modificada.

Como en el resto de los casos, el porcentaje de agrupación es mayor en el caso de que los nodos estén concentrados en 3 provincias. Además, para la estrategia directa, la diferencia respecto a si los nodos están distribuidos en 21 provincias es mucho mayor.

Combinación 6

Diferencia entre ventanas → Mixta

Se permite espera → NO



En este caso, las órdenes a las que se les ha asignado diferencia amplia, al no permitir espera no benefician a la estrategia directa, como ocurría para la combinación 2. Por el contrario, las órdenes a las que se les ha asignado una diferencia ajustada perjudican a la estrategia Hub&Spoke pura. Por esta razón, las estrategias puras devuelven peores resultados.

Las estrategias mixtas obtienen unos resultados similares ya que no hay predominio de una estrategia de distribución sobre otra.

BIBLIOGRAFÍA DE ANEXOS

Las referencias bibliográficas que se han utilizado para la realización de los anexos de este PFC son las siguientes:

- [1] P. Toth y D. Vigo, “The Vehicle Routing Problem”, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.
- [2] G. B. Dantzig y J. H. Ramser, “The truck dispatching Problem”, Management Science, vol. 6, nº 1, pp. 80-91, Oct., 1959.
- [3] G. Clarke y J. Wright, “Scheduling of vehicle from a central depot to a number of delivery points”, Operations Research, vol. 12, nº 4, pp. 568-581, 1964.
- [4] D. Applegate, “The Traveling Salesman Problem: A Computational Study”, Princeton University Press, 2006.
- [5] S. Martello y P. Toth, “Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations”, 1990.
- [6] T. G. Crainic y M. Toulouse, “Parallel strategies for meta-heuristics”, Handbook of metaheuristics, pp. 475-513, 2003.
- [7] S. Kirkpatrick, “Optimization by Simulated Annealing”, Science, vol. 220, nº 4598, pp. 671-680, Mayo, 1983.
- [8] F. Glover, “Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence”, 1986.
- [9] N. Mladenovic y P. Hansen, “Variable neighborhood search”, Computers & Operations Research, vol. 24, pp. 1097-1100, 1997.
- [10] T. Stützle, “Iterated local search for the quadratic assignment problem”, 1999.
- [11] T. Bäck, “Handbook of Evolutionary Computation”, Oxford University Press, 1997.
- [12] F. Glover, “Handbook of Metaheuristic”, Springer, 2003.
- [13] M. Dorigo, “Optimization, Learning and Natural Algorithms”, PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, 1992.
- [14] J. Kennedy y R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS DE ANEXOS

Índice de tablas

Tabla 5.1. Costes 5 órd, 3 prov.....	51
Tabla 5.2. % Agrupación 5 órd, 3 prov.....	51
Tabla 5.3. Costes 5 órd, 21 prov.....	51
Tabla 5.4. % Agrupación 5 órd, 21 prov.....	51
Tabla 5.5. % Rutas directas 5 órdenes	52
Tabla 5.6. Costes 25 órd, 3 prov.	52
Tabla 5.7. % Agrupación 25 órd, 3 prov.	52
Tabla 5.8. Costes 25 órd, 21 prov.....	52
Tabla 5.9. % Agrupación 25 órd, 21 prov.	52
Tabla 5.10. % Rutas directas 25 órdenes	52
Tabla 5.11. Costes 50 órd, 3 prov.	53
Tabla 5.12. % Agrupación 50 órd, 3 prov.	53
Tabla 5.13. Costes 50 órd, 21 prov.	53
Tabla 5.14. % Agrupación 50 órd, 21 prov.	53
Tabla 5.15. % Rutas directas 50 órdenes	53
Tabla 5.16. Costes 100 órd, 3 prov.	54
Tabla 5.17. % Agrupación 100 órd, 3 prov.....	54
Tabla 5.18. Costes 100 órd, 21 prov.....	54
Tabla 5.19. % Agrupación 100 órd, 21 prov.	54
Tabla 5.20. % Rutas directas 50 órdenes	54
Tabla 5.21. Costes 250 órd, 3 prov.....	55
Tabla 5.22. % Agrupación 250 órd, 3 prov.	55
Tabla 5.23. Costes 250 órd, 21 prov.....	55
Tabla 5.24. % Agrupación 250 órd, 21 prov.	55
Tabla 5.25. % Rutas directas 50 órdenes	55
Tabla 6.1. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1	56
Tabla 6.2. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1.....	56
Tabla 6.3. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2	57
Tabla 6.4. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2.....	57
Tabla 6.5. Costes 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3.....	57
Tabla 6.6. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3.....	58
Tabla 6.7. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1	58

Tabla 6.8. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1	58
Tabla 6.9. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2	59
Tabla 6.10. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2	59
Tabla 6.11. Costes 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3	59
Tabla 6.12. Porcentaje agrupación 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3	60
Tabla 6.13. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 1	60
Tabla 6.14. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 1	60
Tabla 6.15. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 2	61
Tabla 6.16. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 2	61
Tabla 6.17. Costes 25 órdenes, 3 provincias. Caso 3	61
Tabla 6.18. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 3 provincias. Caso 3	62
Tabla 6.19. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 1	62
Tabla 6.20. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 1	62
Tabla 6.21. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 2	63
Tabla 6.22. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 2	63
Tabla 6.23. Costes 25 órdenes, 21 provincias. Caso 3	63
Tabla 6.24. Porcentaje agrupación 25 órdenes, 21 provincias. Caso 3	64
Tabla 6.25. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 1	64
Tabla 6.26. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 1	64
Tabla 6.27. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 2	65
Tabla 6.28. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 2	65
Tabla 6.29. Costes 50 órdenes, 3 provincias. Caso 3	65
Tabla 6.30. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 3 provincias. Caso 3	66
Tabla 6.31. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 1	66
Tabla 6.32. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 1	66
Tabla 6.33. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 2	67
Tabla 6.34. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 2	67
Tabla 6.35. Costes 50 órdenes, 21 provincias. Caso 3	67
Tabla 6.36. Porcentaje agrupación 50 órdenes, 21 provincias. Caso 3	68
Tabla 6.37. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 1	68
Tabla 6.38. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 1	68
Tabla 6.39. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 2	69
Tabla 6.40. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 2	69
Tabla 6.41. Costes 100 órdenes, 3 provincias. Caso 3	69
Tabla 6.42. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 3 provincias. Caso 3	70
Tabla 6.43. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 1	70
Tabla 6.44. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 1	70

Tabla 6.45. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 2	71
Tabla 6.46. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 2	71
Tabla 6.47. Costes 100 órdenes, 21 provincias. Caso 3	71
Tabla 6.48. Porcentaje agrupación 100 órdenes, 21 provincias. Caso 3	72
Tabla 6.49. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 1	72
Tabla 6.50. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 1	72
Tabla 6.51. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 2	73
Tabla 6.52. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 2	73
Tabla 6.53. Costes 250 órdenes, 3 provincias. Caso 3	73
Tabla 6.54. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 3 provincias. Caso 3	74
Tabla 6.55. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 1	74
Tabla 6.56. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 1	74
Tabla 6.57. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3	75
Tabla 6.57. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 2	75
Tabla 6.59. Costes 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3	75
Tabla 6.60. Porcentaje agrupación 250 órdenes, 21 provincias. Caso 3	76
Tabla 7.1 Combinaciones de parámetros de simulación	77
Tabla 7.2 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana amplia	79
Tabla 7.3 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana ajustada	79
Tabla 7.4 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana mixta	79
Tabla 7.5. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. amplia	81
Tabla 7.6. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. amplia	82
Tabla 7.7. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	82
Tabla 7.8. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. ajustada	82
Tabla 7.9. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. mixta	83
Tabla 7.10. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. mixta	83
Tabla 7.11. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. amplia	84
Tabla 7.12. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. amplia	84
Tabla 7.13. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. ajustada	85
Tabla 7.14. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. ajustada	85
Tabla 7.15. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. mixta	85
Tabla 7.16. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. mixta	86
Tabla 7.17. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. amplia	86
Tabla 7.18. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. amplia	87
Tabla 7.19. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. ajustada	87
Tabla 7.20. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. ajustada	87
Tabla 7.21. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. mixta	87

Tabla 7.22. 5 órd, 3 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. mixta	88
Tabla 7.23. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. amplia	89
Tabla 7.24. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. amplia	89
Tabla 7.25. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	89
Tabla 7.26. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. ajustada	90
Tabla 7.27. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. mixta	90
Tabla 7.28. 5 órd, 3 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. mixta	90
Tabla 7.29. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana amplia	92
Tabla 7.30. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana ajustada	92
Tabla 7.31. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana mixta	92
Tabla 7.32. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. amplia	93
Tabla 7.33. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. amplia	94
Tabla 7.34. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	94
Tabla 7.35. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. ajustada	94
Tabla 7.36. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. mixta	94
Tabla 7.37. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. mixta	95
Tabla 7.38. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. amplia.....	96
Tabla 7.39. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. amplia	96
Tabla 7.40. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. ajustada.....	96
Tabla 7.41. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. ajustada.....	97
Tabla 7.42. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. mixta.....	97
Tabla 7.43. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. mixta	97
Tabla 7.44. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. amplia.....	98
Tabla 7.45. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. amplia	98
Tabla 7.46. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. ajustada.....	99
Tabla 7.47. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. ajustada	99
Tabla 7.48. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	99
Tabla 7.49. 5 órd, 3 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. mixta	99
Tabla 7.50. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. amplia	100
Tabla 7.51. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. amplia	101
Tabla 7.52. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	101
Tabla 7.53. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. ajustada	101
Tabla 7.54. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. mixta	102
Tabla 7.55. 5 órd, 3 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. mixta	102
Tabla 7.56. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana amplia	104
Tabla 7.57. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana ajustada	104
Tabla 7.58. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana mixta	104

Tabla 7.59. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. amplia	105
Tabla 7.60. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. amplia	106
Tabla 7.61. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	106
Tabla 7.62. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. ajustada	106
Tabla 7.63. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. mixta	106
Tabla 7.64. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. mixta	107
Tabla 7.65. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. amplia.....	108
Tabla 7.66. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. amplia	108
Tabla 7.67. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. ajustada.....	108
Tabla 7.68. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. ajustada.....	109
Tabla 7.69. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. mixta.....	109
Tabla 7.70. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. mixta	109
Tabla 7.71. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. amplia.....	110
Tabla 7.72. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. amplia	110
Tabla 7.73. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. ajustada.....	111
Tabla 7.74. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. ajustada	111
Tabla 7.75. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	111
Tabla 7.76. 5 órd, 3 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. mixta	111
Tabla 7.77. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. amplia	112
Tabla 7.78. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia	113
Tabla 7.79. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	113
Tabla 7.80. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. ajustada	113
Tabla 7.81. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta	114
Tabla 7.82. 5 órd, 3 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta	114
Tabla 7.83. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana amplia	116
Tabla 7.84. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana ajustada	116
Tabla 7.85. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Diferencia de ventana mixta	116
Tabla 7.86. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. amplia	117
Tabla 7.87. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. amplia	118
Tabla 7.88. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	118
Tabla 7.89. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. Ajustada.....	118
Tabla 7.90. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, sin espera, dif. mixta	118
Tabla 7.91. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Directa pura, con espera, dif. mixta	119
Tabla 7.92. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. amplia.....	120
Tabla 7.93. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. amplia.....	120
Tabla 7.94. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. ajustada.....	120
Tabla 7.95. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. ajustada.....	120

Tabla 7.96. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., sin espera, dif. mixta.....	121
Tabla 7.97. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S modif., con espera, dif. mixta	121
Tabla 7.98. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. amplia.....	122
Tabla 7.99. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. amplia	122
Tabla 7.100. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. ajustada.....	122
Tabla 7.101. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. Ajustada	122
Tabla 7.102. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	123
Tabla 7.103. 5 órd, 21 prov. Caso 1. Heurística, con espera, dif. mixta	123
Tabla 7.104. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. amplia	124
Tabla 7.105. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. amplia	124
Tabla 7.106. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	125
Tabla 7.107. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. ajustada	125
Tabla 7.108. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, sin espera, dif. mixta	126
Tabla 7.109. 5 órd, 21 prov. Caso 1. H&S pura, con espera, dif. mixta	126
Tabla 7.110. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana amplia	128
Tabla 7.111. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana ajustada.....	128
Tabla 7.112. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Diferencia de ventana mixta	128
Tabla 7.113. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. amplia	129
Tabla 7.114. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. amplia	130
Tabla 7.115. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	130
Tabla 7.116. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. ajustada	130
Tabla 7.117. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, sin espera, dif. mixta	130
Tabla 7.118. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Directa pura, con espera, dif. mixta	130
Tabla 7.119. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. amplia.....	131
Tabla 7.120. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. amplia.....	132
Tabla 7.121. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. ajustada.....	132
Tabla 7.122. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. ajustada.....	132
Tabla 7.123. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, sin espera, dif. mixta.....	133
Tabla 7.124. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S modif, con espera, dif. mixta.....	133
Tabla 7.125. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. amplia.....	134
Tabla 7.126. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. amplia.....	134
Tabla 7.127. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. ajustada.....	134
Tabla 7.128. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. ajustada.....	134
Tabla 7.129. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	134
Tabla 7.130. 5 órd, 21 prov. Caso 2. Heurística, con espera, dif. mixta	135
Tabla 7.132. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. amplia	136
Tabla 7.133. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. amplia	136

Tabla 7.133. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	137
Tabla 7.134. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. ajustada	137
Tabla 7.135. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, sin espera, dif. mixta	137
Tabla 7.136. 5 órd, 21 prov. Caso 2. H&S pura, con espera, dif. mixta	138
Tabla 7.137. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana amplia	140
Tabla 7.138. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana ajustada.....	140
Tabla 7.139. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Diferencia de ventana mixta	140
Tabla 7.140. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. amplia	141
Tabla 7.141. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. amplia	141
Tabla 7.142. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. ajustada	142
Tabla 7.143. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. ajustada	142
Tabla 7.144. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, sin espera, dif. mixta	142
Tabla 7.145. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Directa pura, con espera, dif. mixta	142
Tabla 7.146. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. amplia.....	144
Tabla 7.147. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. amplia.....	144
Tabla 7.148. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. ajustada.....	144
Tabla 7.149. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. ajustada.....	144
Tabla 7.150. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, sin espera, dif. mixta.....	145
Tabla 7.151. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S modif, con espera, dif. mixta.....	145
Tabla 7.152. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. amplia.....	146
Tabla 7.153. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. amplia.....	146
Tabla 7.154. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. ajustada.....	146
Tabla 7.155. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, con espera, dif. ajustada.....	146
Tabla 7.156. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	147
Tabla 7.157. 5 órd, 21 prov. Caso 3. Heurística, sin espera, dif. mixta.....	147
Tabla 7.158. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. amplia	148
Tabla 7.159. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia	148
Tabla 7.160. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. ajustada	149
Tabla 7.161. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. amplia	149
Tabla 7.162. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, sin espera, dif. mixta	149
Tabla 7.163. 5 órd, 21 prov. Caso 3. H&S pura, con espera, dif. mixta	150

Índice de figuras

Figura 7.1. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Localización de nodos	80
Figura 7.2. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Directa pura.....	81
Figura 7.3. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. H&S modif.	83
Figura 7.4. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. Heurística	86

Figura 7.5. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 1. H&S pura.....	88
Figura 7.6. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Directa pura.....	93
Figura 7.7. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. H&S modif.	95
Figura 7.8. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. Heurística	98
Figura 7.9. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 2. H&S pura.....	100
Figura 7.10. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Directa pura.....	105
Figura 7.11. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. H&S modif	107
Figura 7.12. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. Heurística	110
Figura 7.13. 5 órdenes, 3 provincias. Caso 3. H&S pura.....	112
Figura 7.14. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Directa pura.....	117
Figura 7.15. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. H&S modif.	119
Figura 7.16. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. Heurística	121
Figura 7.17. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 1. H&S pura.....	123
Figura 7.18. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Directa pura.....	129
Figura 7.19. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. H&S modif.	131
Figura 7.20. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. Heurística	133
Figura 7.21. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 2. H&S pura.....	135
Figura 7.22. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Directa pura.....	141
Figura 7.23. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. H&S modif	143
Figura 7.24. Situación particular de nodos.....	143
Figura 7.25. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. Heurística	145
Figura 7.26. 5 órdenes, 21 provincias. Caso 3. H&S pura.....	147
Figura 8.1. Porcentaje agrupación combinación 1, 3 provincias.	151
Figura 8.2. Porcentaje agrupación combinación 1, 21 provincias.....	151
Figura 8.3. Porcentaje agrupación combinación 2, 3 provincias.	152
Figura 8.4. Porcentaje agrupación combinación 2, 21 provincias.	152
Figura 8.5. Porcentaje agrupación combinación 3, 3 provincias.	153
Figura 8.6. Porcentaje agrupación combinación 1, 21 provincias.	153
Figura 8.7. Porcentaje agrupación combinación 4, 3 provincias.	154
Figura 8.8. Porcentaje agrupación combinación 4, 21 provincias.	154
Figura 8.9. Porcentaje agrupación combinación 5, 3 provincias.	155
Figura 8.10. Porcentaje agrupación combinación 5, 21 provincias.	155
Figura 8.11. Porcentaje agrupación combinación 6, 3 provincias.	156
Figura 8.12. Porcentaje agrupación combinación 6, 21 provincias.	156

